
В. Ф. Самойлов
КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТЕЛЕВИЗИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ
300
400
500
600
3
4
5
6
7
8
550
600
МАССОВАЯ РАДИО БИБЛИОТЕКА
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 475

В. Ф. САМОЙЛОВ

КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТЕЛЕВИЗИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1963 ЛЕНИНГРАД

В брошюре рассматриваются основные качественные показатели телевизионного изображения: контрастность, четкость и заметность мельканий изображения. Даются количественная оценка этих показателей и их зависимость от свойств зрения, параметров аппаратуры и телевизионного канала связи. Выясняется влияние шумов на качество изображения.

Брошюра рассчитана на радиолюбителей, знакомых с основами телевизионной техники.

С17 *Самойлов Владимир Федорович*

Качественные показатели телевизионного изображения. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963.

56 стр. с илл. (Массовая радиобиблиотека, вып. 475)

621.397:621.391.837.

Редактор *К. Г. Лопатин* Техн редактор *Н. А. Бульдяев*

Обложка художника *А. М Кувшинникова*

Сдано в набор 30/III 1963 г. Подписано к печати 13/VI 1963 г.

Т-07371 Бумага 84×108 1/32 2,87 печ. л Уч.-изд. л 3,6

Тираж 75 000 экз. Цена 11 коп Зак. 159

Типография № 1 Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

Основной технической задачей телевидения является создание на приемном экране изображения, как можно более приближающегося по виду к передаваемому объекту. Сцена, передаваемая по телевидению, обычно обладает весьма широким диапазоном особенностей и качественных показателей. Она может содержать большое количество красок, полутеней, крупных, мелких и средних деталей; для нее характерно наличие разнообразных видов движения, объемности передаваемых объектов.

Естественно, что чем полнее, точнее телевизионное изображение воспроизводит передаваемую сцену, тем более сложной, дорогой, мало надежной и громоздкой оказывается телевизионная техника. Между тем, возможно, бóльшая простота, надежность и дешевизна являются весьма существенными требованиями к телевизионной системе, в особенности в радиовещательном телевидении.

Для телевизионного радиовещания характерна его массовость — многомиллионный парк телевизоров. Очевидно, что массовость несовместима со сложной и громоздкой телевизионной системой, в особенности в ее радиоприемной части. Массовость требует упрощения технической системы, а упрощение приводит к необходимости отказаться от попыток передачи полного комплекса качественных показателей телевизионного изображения.

Таким образом возникает вопрос, какие качественные показатели изображения являются относительно второстепенными и что можно в первую очередь исключить из передачи.

Можно согласиться, что цвет и объемность являются относительно второстепенными по сравнению с другими показателями, передача которых совершенно необходима. К таким необходимым качественным показателям следует отнести четкость и контрастность (и связанное с ней число градаций яркости), а также воспроизведение слитности движения.

Чем полнее телевизионная система воспроизводит четкость, контрастность и слитность движения, тем сложнее оказывается аппаратура. Чтобы избежать ненужной сложности и тем самым повысить доступность телевизионного вещания для широкой аудитории телезрителей, надо правильно определить те границы необходимых показателей, выше которых двигаться практически бесполезно.

Для решения этой задачи следует, во-первых, уметь находить количественную оценку указанных показателей. Во-вторых, нужно иметь в виду, что эти границы связаны с ограниченностью челове-

ческого зрения и что глаз является тем прибором, которым в конце концов определяются эти границы.

В настоящей брошюре рассматриваются основные качественные показатели телевизионного изображения, создаваемого исправной аппаратурой, выясняется возможность количественной оценки этих показателей, их зависимость от свойств зрения и телевизионной системы. Из-за ограниченности объема брошюры мы не рассматриваем здесь важные и интересные вопросы снижения качества изображения за счет неправильности в регулировке или неисправности телевизионной аппаратуры (нелинейность развертки, пластика, тянучки, повторы и др.). По той же причине в брошюре не рассматривается методика определения качественных показателей изображения по телевизионной испытательной таблице. Впрочем, этот вопрос достаточно хорошо освещен в соответствующей литературе.

Мы надеемся, что пытливому читателю, размышляющему над вопросами, рассматриваемыми в этой брошюре, придет на ум какая-нибудь новая идея, позволяющая улучшить телевизионное изображение без существенного усложнения аппаратуры.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ЧАСТОТА КАДРОВ

1. ПЕРЕДАЧА ДВИЖУЩИХСЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Напомним, как в телевидении происходит передача неподвижных изображений. Электронный луч (рис. 1), двигаясь по мишени передающей трубки, строка за строкой «ощупывает» электронное изображение (потенциальный рельеф), создавая таким образом телевизионный сигнал. Этот сигнал после усиления и соответствующего преобразования подается по каналу связи на приемники, затем

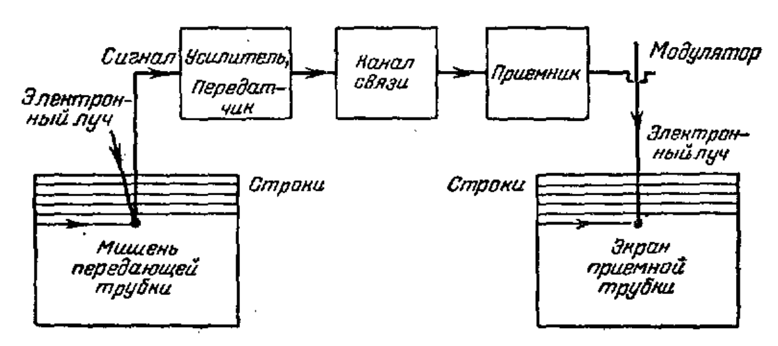


Рис. 1. Упрощенная схема телевизионной передачи.

на модулятор электронного луча приемной трубки. Луч приемной трубки, интенсивность которого управляется телевизионным сигналом, двигаясь по экрану, строка за строкой воспроизводит изображение.

Полный комплект всех строк одного неподвижного изображения образует кадр.

Точно такой же принцип передачи неподвижных изображений (элемент за элементом, строка за строкой) используется, например, в фототелеграфии. Однако в отличие от нее телевидение позволяет передавать движущиеся изображения. Эта замечательная особенность делает телевидение особенно интересным и важным видом техники.

В телевидении принцип передачи движущихся изображений взят из кинотехники. С этой целью передается серия отдельных неподвижных изображений, отличающихся друг от друга фазой движения (рис. 2). При последовательной передаче этих неподвижных изображений вследствие инерционности зрения создается ощущение слитного движения.

Может показаться, что для лучшего, более точного воспроизведения движения следует как можно больше увеличивать число кадров в секунду. Однако вследствие той же инерционности зрения повышение числа кадров выше определенной величины оказывается бесполезным, так как глаз все разно уже не будет замечать какого-

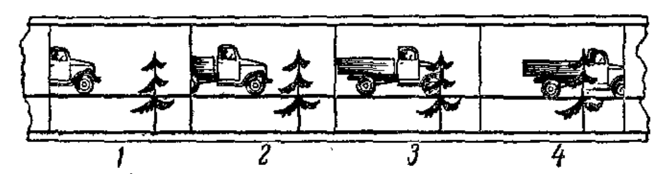


Рис. 2. Метод передачи движущихся изображений отдельными последовательными кадрами.

либо улучшения в передаче движения. Кроме того, и это очень существенно, чрезмерно большое увеличение числа кадров в секунду приведет к недопустимому и неоправданному расширению спектра частот телевизионного сигнала, так как ширина этого спектра пропорциональна числу кадров в секунду. В свою очередь для передачи и приема чрезмерно большого спектра частот необходима очень сложная телевизионная система. Вопрос о требуемой полосе частот телевизионного сигнала является очень важным, так как с ним связаны важнейшие технико-экономические показатели телевизионной аппаратуры и канала связи. К этому вопросу мы еще вернемся.

В связи со сказанным интересно выяснить, при каком минимальном числе кадров в секунду становится заметной прерывистость, скачкообразность передаваемого движения. Соответствующие эксперименты показывают, что эта минимальная частота смен кадров составляет 10—15 кадров в секунду (чем быстрее движение, тем заметнее прерывистость его передачи).

Таким образом, основываясь на этих практических данных, следовало бы выбирать частоту кадров порядка 16—20 кадров в секунду. Однако другое неприятное явление заставляет значительно увеличивать требуемую частоту кадров, так как при частоте 16—20 кадров в секунду, хотя движение и будет казаться слитным, имеют место заметные мелькания всего изображения в целом. Для устранения этих мельканий приходится частоту кадров увеличивать еще в 2—2,5 раза.

2. ВЫБОР ЧАСТОТЫ КАДРОВ

Таким образом, частота кадров определяется не слитностью движения, а мельканиями кадров. Количественное определение необходимого числа кадров в секунду связано с так называемой критической частотой мельканий, понятие о которой можно полу-

чить из следующего простого опыта. Перед светящейся лампой вращается диск, половина которого прозрачна (рис. 3). Наблюдая свет этой лампы через медленно вращающийся диск, мы получим ощущение мелькающего источника света. Увеличивая скорость вращения диска, можно добиться при некотором числе оборотов в секунду исчезновения мелькания света; лампа будет казаться светящейся непрерывно.

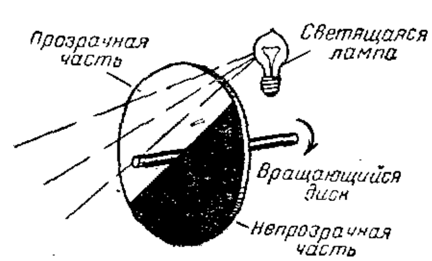


Рис. 3. Определение критической частоты мельканий.

Частота мелькания света, при которой (и выше которой) источник кажется непрерывно светящимся, называется критической частотой мельканий $F_{кр}$. Она зависит в основном от яркости источника света и его цвета. Наиболее заметны мелькания для желто-зеленого света, так как человеческий глаз имеет здесь наибольшую чувствительность.

Особенно существенна для практики кино и телевидения зависимость критической частоты мельканий от яркости B. На рис. 4 представлен полученный экспериментально график этой зависимости, показывающий, что критическая частота мельканий растет с увеличением яркости. Таким образом, при небольших яркостях экрана можно обойтись небольшой частотой смен кадров в секунду, и при этом еще не будет заметно мелькание кадров. Эта возможность использовалась на первых порах развития радиовещательного телевидения (1934—1937 гг.), когда яркость экрана телевизора в существовавших тогда механических системах составляла только десятые доли нит (экраном служила неоновая лампа). В старых системах можно было обойтись частотой 12,5 кадра в секунду без заметного мелькания. Яркость экрана современного телевизора в сотни раз больше. Из графика на рис. 4 видно, что с учетом критической частоты мельканий для яркости в 30—40 *нт* частота должна составлять 40—50 кадров в секунду.

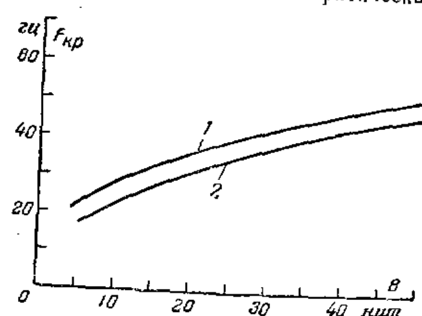


Рис. 4. Зависимость критической частоты мельканий от яркости источника света.

1 — для лампы с диском; *2* — для экрана кинескопа.

С точки зрения экономии полосы частот телевизионного сигнала можно было бы обойтись, например, низшим пределом 40 кадров в секунду. Однако в радиовещательном телевидении частота кадров выбирается точно равной частоте электросети, т. е. 50 кад-

ров в секунду. В этом случае, во-первых, обеспечивается с небольшим запасом перекрытие критической частоты мельканий и, во-вторых, осуществляется так называемая «привязка» частоты кадров к частоте электросети, питающей как передающую, так и приемную телевизионную аппаратуру.

Такая привязка (т. е. точное равенство частоты электросети и частоты телевизионных кадров) необходима для уменьшения помех от питающей электросети, воздействующих на телевизионное изображение двояким образом. Во-первых, попадая из выпрямителя телевизора и из цепей накала ламп в видеоусилитель приемника, эти помехи появляются на экране кинескопа в виде крупных горизонтальных светлых и темных полос (рис. 5,*а*). Во-вторых, воздействуя на генератор горизонтальной развертки, они вызывают искривление вертикальных краев изображения (рис. 5,б).

а) б)

Рис. 5. Виды помех на экране кинескопа, создаваемых сетью переменного тока.

а — появление теней на изображении; *б* — искривление вертикальных краев.

Если эти два вида воздействия помех проявляются в исправном телевизоре не очень сильно и если частота электросети и частота кадров в точности равны, то наличие этих неподвижных помех не так заметно и обычно совершенно не привлекает внимания телезрителя. Если же частоты электросети и кадров хотя бы немного различны, то такие помехи будут перемещаться по экрану. Характерно, что даже малая движущаяся помеха оказывается во много раз более заметной и привлекающей внимание, чем неподвижная.

Таким образом, в телевизионном вещании частота кадров выбирается равной частоте электросети. Для точного соблюдения этого технического условия в аппаратуре телевизионного центра имеется устройство, которое автоматически подстраивает частоту кадров к частоте электросети.

Вместе с тем следует отметить, что привязка частоты кадров к частоте электросети имеет существенный технический недостаток, резко проявляющийся при обмене телевизионными программами между различными городами и странами с разными электросетями. Например, электросети в Москве и Киеве не связаны точно по частоте и фазе. Поэтому при передаче телепрограмм из Киева в Москву (или обратно) нельзя решить однозначно, к какой электросети должна быть привязана частота кадров — к московской или к киевской. Отсюда неизбежны движущиеся помехи на изображении или у московских, или у киевских телезрителей.

По-видимому, в будущем (так склонны думать многие специалисты) частота кадров вообще не будет привязываться к частоте электросети. В качестве задающего будет использоваться генератор двойной строчкой частоты (31 250 *гц*) центральной телевизионной станции (например, московской). Для точности работы этот генератор будет иметь кварцевую стабилизацию. Задающие генераторы телецентров других городов, получая эту частоту по каналу связи (по радио или кабелю), должны иметь к ней жесткую привязку.

Этот метод с целью устранения видимых движущихся помех потребует улучшения качества работы блока питания телевизора. В первую очередь должен быть улучшен фильтр выпрямителя и приняты меры для магнитной и электростатической экранировки элементов блока развертки.

Сравнивая лампу с вращающимся диском-заслонкой (рис. 3) и экран телевизора, можно прийти к заключению о совершенно разном характере работы этих двух типов мелькающих источников света. Свет от лампы поочередно резко то прекращается, то возникает, в то время как свечение экрана работающего телевизора не прекращается полностью никогда. Вследствие явления послесвечения светящаяся строка на экране кинескопа, после того как с нее

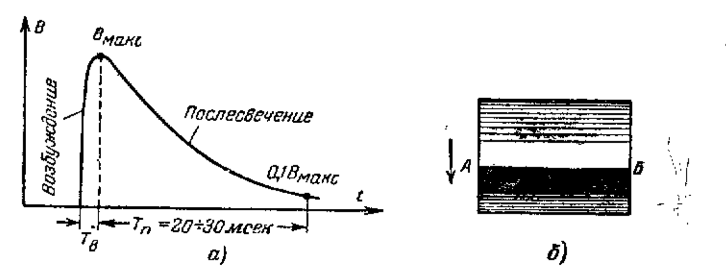


Рис. 6. Характер свечения экрана кинескопа.

а — кривая послесвечения люминофора ($T_в$ — время возбуждения; $T_п$ — время послесвечения); *б* — перемещение сверху вниз светлой границы *АБ* на экране.

сойдет электронный луч, гаснет не сразу, а постепенно, примерно по экспоненциальному закону (рис. 6,*а*).

Для простоты представления будем рассуждать о «пустом» светящемся растре (без изображения). Характер мелькания на экране кинескопа будет следующим (рис. 6,*б*). Наибольшей яркостью будет обладать строка, на которой находится электронный луч (строка *АБ* на рис. 6,*б*). Сверху этой строки яркость экрана, согласно графику на рис. 6,*а*, будет постепенно убывать. Ниже строки *АБ* экран будет темным. Граница *АБ* будет перемещаться по мере развертки электронным лучом сверху вниз. При небольшой частоте кадров зритель увидит непрерывно перемещающуюся сверху вниз светлую ленту.

Эксперименты, проведенные с достаточно большим числом наблюдателей, дают для такого своеобразного светящегося объекта зависимость критической частоты мельканий от яркости, показанную на рис. 4 (кривая *2*). В этом случае критическая частота мельканий является той частотой, при которой наблюдатель не видит на экране телевизора перемещающейся ленты и экран кажется ему равномерно и непрерывно светящимся.

Сравнивая кривые *1* и *2* на рис. 4, мы видим, что для экрана телевизора критическая частота мельканий оказывается ниже, чем для лампы с вращающейся заслонкой, и борьба с мельканиями оказывается несколько легче. Это объясняется наличием послесвечения экрана кинескопа, смягчающего неприятное явление мелькания.

3. ЧЕРЕССТРОЧНАЯ РАЗВЕРТКА

Теперь мы могли бы сказать, что частоту кадров в радиовещательном телевидении следует брать 50 кадров в секунду. Однако оказывается, что при этой частоте кадров и стандартном числе строк разложения (625 строк) полоса частот телевизионного сигнала будет чрезмерно большой (более 12 *Мгц*). Сигнал, имеющий такую громадную полосу частот, трудно передавать без заметных искажений по каналу связи, трудно обрабатывать его соответствующим образом в телевизионном приемнике (детектировать, усиливать) перед подачей на приемную трубку.

Рис. 7. Чересстрочная развертка.

Техника телевидения нашла способ обойти эти затруднения — снизить частоту кадров вдвое (и соответственно сузить спектр вдвое) с сохранением всех основных качеств изображения (четкости, контрастности) и в то же время осуществить необходимое перекрытие критической частоты мельканий. Этот технический прием называется чересстрочной разверткой.

Чересстрочная развертка в принципе напоминает соответствующий прием проецирования кинофильма. Как вероятно известно читателю, в кино передается 24 кадра в секунду. Однако как мы уже знаем, при существующей яркости киноэкрана (десятки нит) эта частота смен кадров оказывается недостаточной для перекрытия критической частоты мельканий. Кинотехника нашла выход из положения методом показа одного и того же кадра дважды. В проекционном киноаппарате перед фильмовым окном вращается специальный диск-заслонка (обтюратор), открывающий и закрывающий каждый кадр кинопленки дважды за время его проецирования. Тем самым как бы вдвое увеличивается число показываемых зрителю кадров (назовем их полукадрами). Таким образом, число полукадров в секунду составляет 48, что достаточно для перекрытия критической частоты мельканий.

В радиовещательном телевидении используется сходный метод. Как известно, полный телевизионный кадр содержит по отечественному стандарту 625 строк. При чересстрочной развертке это полное число строк разложения передается в два приема — двумя полукадрами или полями. В первом полукадре происходит, например, развертка нечетных строк 1, 3, 5,... и т. д. Во втором полукадре передаются четные строки 2,4,6,... и т. д. (рис. 7). Частота полукадров (полей) выбирается равной 50 полукадрам в секунду. Полный кадр, состоящий из двух полукадров, имеет частоту 25 кадров в секунду.

Хотя каждый полукадр содержит только половину строк (312,5), изображения двух полукадров вследствие инерционности зрения воспринимается зрителем как один кадр с полным числом строк (625). Чересстрочная развертка, удваивая частоту смен изображений на экране, позволяет, не увеличивая требуемой полосы частот телевизионного сигнала, перекрыть с необходимым запасом критическую частоту мельканий.

Метод чересстрочной развертки вследствие его эффективности нашел повсеместное применение в радиовещательном телевидении не только у нас, но и в других странах.

Развивая далее идею чересстрочной развертки можно было бы полный кадр разбить более чем на два полукадра, например на четыре «четвертькадра», имеющих соответственно каждый одну четвертую часть полного числа строк. Теоретически такая система позволила бы сократить требуемую полосу частот еще вдвое без заметного снижения качества изображения. Однако неустойчивость работы синхронизации и сложность аппаратуры заставили на практике отказаться от применения такой четырехкратной чересстрочной развертки.

Таким образом, учитывая необходимость привязки частоты кадров к частоте электросети, перекрытия критической частоты мельканий и возможную экономию в полосе телевизионных частот, частота кадров выбирается 25 кадров в секунду при 50 полукадрах в секунду. Следует подчеркнуть, что часто на практике для краткости полукадровая частота называется кадровой. Например, говорят, что частота пилообразного тока кадровой (на самом деле полукадровой) развертки равна 50 *гц*.

В заключение коснемся еще небольшого вопроса. Как нам известно, в кинотехнике частота смен кадров выбрана 24, а в телевидении эта частота составляет 25 кадров в секунду. Таким образом, кинофильм, используемый для демонстрации по телевидению, будет проходить несколько скорее. Это увеличение скорости протяжки пленки составит 4%. На 4% повысятся, очевидно, тона всех составляющих звукового сопровождения.

Например, полуторачасовая кинокартина, передаваемая по телевидению, окончится на три минуты раньше, чем при демонстрации ее в кинотеатре. Однако 4% является такой небольшой величиной, что телезритель не замечает ни увеличения скорости протяжки, ни повышения тонов звука.

ГЛАВА ВТОРАЯ

КОНТРАСТНОСТЬ

4. КОНТРАСТНОСТЬ ТЕЛЕВИЗИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Для спокойного, неутомительного наблюдения телевизионного изображения необходимо, чтобы оно обладало достаточной яркостью. Недостаточная яркость, так же как и чрезмерно большая, будет плохо восприниматься телезрителем. В случае малой яркости зритель будет невольно с напряжением всматриваться в изображение на экране, что быстро приведет его к утомлению. Чрезмерно большая, слепящая яркость также быстро утомляет зрителя.

Многолетний опыт показывает, что как в кино, так и в телевидении надо считать нормальной на белых участках изображения яркость порядка 20—40 *нт*. В неполностью затемненном помещении необходима яркость, достигающая 40 *нт*. В темном же помещении окажется достаточной яркость в 20 *нт*. Следует иметь в виду, что большая яркость экрана в тщательно затемненном помещении вызывает неприятное ощущение «зияющего окна» (яркий прямоуголь-

ник на черном фоне). Гораздо мягче и спокойнее выглядит изображение в окружении небольшой внешней подсветки.

Понятие контрастности тесно связано с яркостью изображения. На изображении имеются темные и светлые участки. Отношение яркости самого светлого места к яркости самого темного называется контрастностью

$$\beta = \frac{B_{\text{макс}}}{B_{\text{мин}}}. \qquad (1)$$

Контрастность является важнейшим показателем качества телевизионного изображения Если сравнивать ее со звуковым радиовещанием, то она подобна динамическому диапазону. Чем больше контрастность, тем сочнее изображение, тем большее количество световых полутонов может оно иметь, тем меньше заметны шумы. Хорошая контрастность делает изображение более естественным, увеличивает его разборчивость.

Хотелось бы, чтобы контрастность изображения приближалась к контрастности самого объекта, передаваемого по телевидению (табл. 1 дает читателю представление о контрастности некоторых встречающихся на практике объектов).

Таблица 1

Контрастность некоторых объектов

Объект	Контрастность
Ландшафт со светлыми предметами и тенью в яркий солнечный день	1 000
Обычный ландшафт	100
Внутреннее помещение с искусственным освещением	20—50
Киноэкран	50—100
Хорошая фотография	50—100
Мелкие детали в телевизионном изображении	5—8
Крупные (более 1 *см*) детали в телевизионном изображении	30—40

К сожалению, ряд технических обстоятельств существенно снижает контрастность телевизионного изображения.

5. ПРИЧИНЫ СНИЖЕНИЯ КОНТРАСТНОСТИ ТЕЛЕВИЗИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Из-за особенностей воспроизведения изображения в телевидении следует различать два вида контрастности: контрастность мелких деталей и контрастность крупных деталей. По ряду технических причин эти контрастности сильно отличаются друг от друга, величина их зависит от разных факторов.

Недостаточность контрастности в значительной степени вызывается несовершенством работы приемной электронно-лучевой трубки (кинескопа). В целом контрастность как мелких, так и крупных деталей снижается в кинескопе за счет внутренней подсветки, вызываемой несколькими причинами. Это явление поясняется на рис. 8.

Люминофор, нанесенный на переднее стекло кинескопа, под действием электронного луча излучает свет в обе стороны: наружу (в сторону зрителя) и внутрь колбы. Этот внутренний свет, частично отражаясь от внутреннего покрытия колбы, рассеивается и вновь попадает на экран кинескопа, где засвечивает темные места изображения (луч *ГВ*).

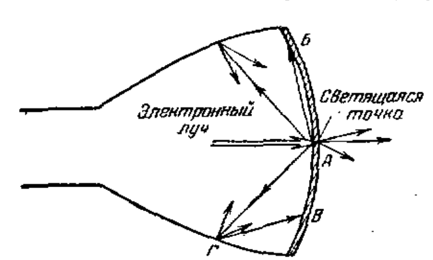


Рис. 8. Явление внутренней подсветки в кинескопе.

Для создания большего сопротивления наружному атмосферному давлению переднее стекло колбы кинескопа всегда делается немного выпуклым. Эта кривизна экрана создает возможность непосредственного попадания лучей света из светлого места изображения в темное (например, светового луча *АБ* на рис. 8).

Может показаться, что как отраженные лучи *ГВ*, так и косые лучи *АБ* ввиду их крайне низкой интенсивности не могут существенно повлиять на контрастность изображения. Однако это не так, что можно видеть из следующего примера.

Допустим, что без внутренней подсветки контрастность изображения достаточно велика и составляет примерно

$$\beta_0 = \frac{B_{\text{макс}}}{B_{\text{мин}}} = \frac{100}{1} = 100,$$

т. е. $B_{\text{мин}} = 0{,}01\ B_{\text{макс}}$. Свет, отраженный от внутренней поверхности кинескопа и попадающий обратно на экран, из-за своей малой интенсивности очень незначительно повышает яркость экрана. Пусть эта дополнительная яркость ΔB, вызываемая паразитной подсветкой, составляет только 1% от $B_{\text{макс}}$. Тогда контрастность с подсветкой

$$\beta_1 = \frac{B_{\text{макс}} + \Delta B}{B_{\text{мин}} + \Delta B} = \frac{B_{\text{макс}} + 0{,}01 B_{\text{макс}}}{0{,}01 B_{\text{макс}} + 0{,}01 B_{\text{макс}}} = 50.$$

Значит, $\beta_1 = 0{,}5\beta_0$, т. е. в нашем примере только при однопроцентной паразитной подсветке контрастность уменьшается вдвое.

Другим явлением, существенно снижающим контрастность мелких (и средних) деталей, является ореол. Причина возникновения этого явления поясняется на рис. 9,*а*. Электронный луч, попадая на экран кинескопа, например в точку *А*, возбуждает люминофор. Расходящиеся из этой точки световые лучи частично проходят вперед, к зрителю, а частично на границе «стекло—воздух» отражаются обратно, освещая люминофор вокруг точки *А*. Таким образом, зритель видит ярко святящуюся точку, окруженную менее ярким кольцом — ореолом (рис. 9,*б*).

Диаметр ореола d_0 можно приблизительно определить исходя из явления полного внутреннего отражения. При достаточно больших углах падения световых лучей на поверхность раздела «стекло—воздух» эти лучи полностью отражаются, совсем не проникая

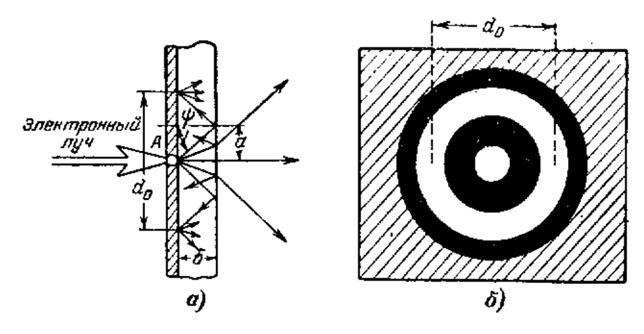


Рис. 9. Образование ореола.
а — прохождение световых лучей в толще стекла; *б* — форма светящегося пятна.

через раздел; угол ψ (рис 9,*а*), при котором (и более которого) происходит это явление, называется углом полного внутреннего отражения. Два раздела «стекло—воздух» угол ψ составляет 42°.

Основываясь на этой величине угла полного внутреннего отражения и построениях на рис. 9,*а*, можно найти диаметр ореола:

$$\frac{a}{\delta} = \operatorname{tg} 42° = 0,9; \; a = 0,9\delta; \; d_0 = 4a = 3,6\delta \qquad (2)$$

(эту формулу можно считать только прикидочной, так как ореол не имеет резко выраженных границ; для него характерна размытость очертаний). Толщина стекла экрана кинескопа δ обычно составляет около 5 *мм*. Отсюда диаметр ореола $d_0 = 3,6 \cdot 5 = 18$ *мм*.

Если на изображении имеются мелкие детали — темные точки или линии, то при развертке эти темные элементы будут покрываться ореолом от соседних светлых мест и их контрастность резко упадет. Очевидно, что снижение контрастности вследствие явления ореола будет иметь место, начиная от самых мелких деталей (и самых тонких линий) до деталей, имеющих размеры приблизительно $d_0/2 = 10$ *мм*. Точно так же ореол снижает контрастность резких переходов от светлого к темному.

Как показывают расчеты и эксперименты, контрастность небольших темных деталей на светлом фоне в связи с явлением ореола не может быть больше 6—10.

Снижение контрастности мелких деталей иногда происходит также вследствие снижения усиления в телевизионном тракте высоких частот, а также из-за так называемых апертурных искажений, связанных с конечным диаметром развертывающего электронного луча. Эти вопросы мы рассмотрим позже (в главе о четкости).

Существенное влияние на контрастность оказывает внешняя подсветка. Наблюдение телевизионного изображения часто происходит в незатемненном полностью помещении. Например, недалеко от телевизора может быть включена настольная лампа или сквозь неплотно задернутую штору пробивается уличный свет. Эта внешняя подсветка, освещая темные места изображения, снижает его контрастность.

Какие же существуют методы борьбы с вышеописанными явлениями, каким техническим путем можно добиться улучшения контрастности на экране телевизора? Можно указать в основном на три метода: правильный подбор формы колбы кинескопа, металлизацию экрана, использование дымчатого стекла для экрана.

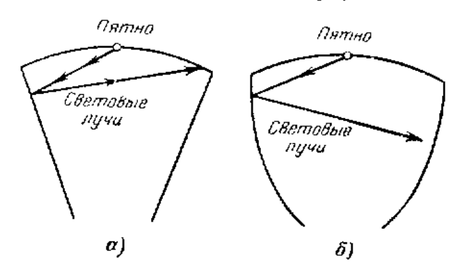


Рис. 10. Влияние формы колбы кинескопа на интенсивность внутренней подсветки.
а — нерациональная форма колбы; *б* — форма колбы, уменьшающая внутреннюю подсветку.

На рис. 10 изображены два вида формы колбы кинескопа. Если колба имеет форму конуса (рис. 10,*а*), то световые лучи, исходящие от люминофора и падающие на поверхность колбы, после отражения попадают опять на экран и снижают контрастность изображения. Если же коническую часть колбы изогнуть правильным образом (рис. 10,*б*), то световые лучи, отражаясь от такой поверхности, не будут достигать экрана.

Эффективным средством улучшения контрастности и повышения яркости телевизионного изображения является покрытие экрана кинескопа изнутри тонким алюминиевым слоем (рис. 11,*а*). Тол-

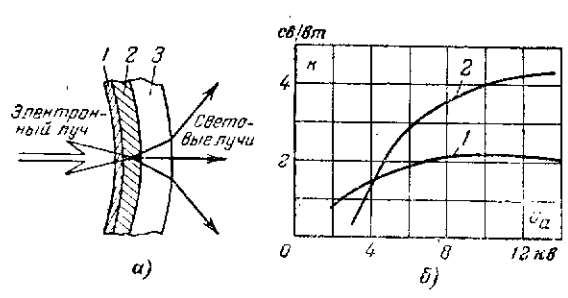


Рис. 11. Улучшение контрастности и яркости телевизионного изображения за счет внутренней металлизации экрана кинескопа.
а — схематический разрез алюминизированного экрана (*1* — слой алюминия; *2* — слой люминофора; *3* — переднее стекло трубки); *б* — зависимость коэффициента светоотдачи *k* от анодного напряжения U_a для неметаллизированного (*1*) и металлизированного (*2*) экранов.

щина алюминиевого покрытия составляет обычно 0,05—0,5 *мк*. Электронный луч, движущийся со скоростью в 6 *кв* и более (анодное напряжение кинескопа), легко «пробивает» эту пленку и возбуждает люминофор.

Алюминиевая пленка не пропускает световые лучи внутрь колбы, чем существенно улучшается контрастность. Кроме того, эта пленка служит своеобразным зеркалом, отражающим обратные световые лучи вперед — к зрителю. Таким образом, яркость изображения практически удваивается.

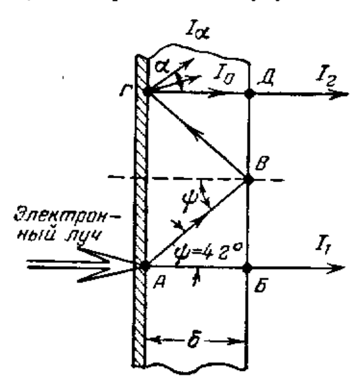


Рис. 12. Схема прохождения световых лучей в переднем стекле кинескопа.

На рис. 11,*б* представлен график светоотдачи экрана с алюминиевой пленкой и без нее. При анодном напряжении более 10 *кв* алюминизированный экран дает вдвое бо́льшую силу света на 1 *вт* мощности электронного луча.

Улучшая контрастность крупных деталей за счет устранения внутренней подсветки, алюминиевая пленка практически никак не влияет на уменьшение ореола, т. е. контрастность мелких деталей, несмотря на наличие пленки, остается низкой. Для улучшения контрастности мелких деталей используется дымчатое стекло (нейтральный фильтр), из которого изготовляется экран кинескопа. Добавлением примесей при варке стекла добиваются повышенного поглощения света в нем. Читатель, вероятно, имел дело с такими стеклами, пользуясь очками, защищающими глаза от яркого солнечного света.

Коэффициентом пропускания света τ прозрачной средой (стеклом, водой и пр.) назовем отношение прошедшего сквозь среду светового потока к падающему на нее потоку:

$$\tau = \frac{F_{\text{прош}}}{F_{\text{пад}}}. \qquad (3)$$

Значения этого коэффициента могут быть от нуля (полное поглощение света средой) до единицы (100% пропускание).

Для выяснения работы дымчатого стекла как устройства, увеличивающего контрастность, обратимся к рис. 12. Прямой световой луч I_1, исходящий из светящейся точки *А* люминофора, проходит в дымчатом стекле путь *АБ*. Луч паразитной подсветки I_2, вызванный явлением ореола, проходит в дымчатом стекле гораздо больший путь *АВГД* и поэтому поглощается значительно больше. Основываясь на геометрических соотношениях на рис. 12 и считая, что в точках *А* и *Г* свет рассеивается по закону Ламберта ($I_\alpha = I_0 \cos \alpha$), можно получить следующую формулу для контрастности при наличии ореола:

$$\beta = \frac{I_1}{I_2} = \frac{\pi\left(1 + a\,\frac{2\delta}{\cos 42°}\right)}{\rho \cos 42°}, \qquad (4)$$

где ρ — коэффициент отражения света в точке *Г*;
a — коэффициент поглощения света на единицу толщины;
42° — угол полного внутреннего отражения;
δ — толщина стекла.

Приняв (из практики) коэффициент отражения света поверхностью люминофора $\rho = 0,8$ и имея в виду, что $\pi = 3,14$, а $\cos 42° = 0,74$, получим:

$$\beta = 5,4 + 14,6 a\delta. \qquad (5)$$

Произведение $a\delta$ в этой формуле представляет собой полный коэффициент поглощения в стекле в перпендикулярном направлении. Он связан с коэффициентом пропускания τ следующим соотношением:

$$a\delta = \frac{1-\tau}{\tau}. \qquad (6)$$

Подставив $a\delta$ из соотношения (6) в выражение (5), получим практическую формулу

$$\beta = 5,4 + 14,6\,\frac{1-\tau}{\tau}, \qquad (7)$$

представляющую собой зависимость контрастности мелких деталей от коэффициента пропускания переднего стекла кинескопа при наличии ореола.

На рис. 13 представлен график зависимости $\beta = f(\tau)$, построенный на основании формулы (7). Из этого графика следует, что, заменив обычное стекло ($\tau = 0,9 \div 0,95$) на дымчатое ($\tau = 0,5$), можно поднять контрастность мелких деталей в $\frac{20}{5,5} = 3,5 \div 4$ раза. Дальнейшее уменьшение коэффициента пропускания ($\tau < 0,5$) хотя еще и увеличит контрастность, но зато недопустимо снизит яркость изображения.

Рис. 13. Зависимость контрастности телевизионного изображения от коэффициента прозрачности стекла экрана.

Дымчатое переднее стекло кинескопа также хорошо противодействует подсветке экрана наружными источниками света. На рис. 14,*а* схематически обозначены лучи наиболее светлого $B_{\text{макс}}$ и наиболее темного $B_{\text{мин}}$ участков изображения, а также лучи внешней подсветки ΔB. Идея улучшения контрастности заключается в том, что полезные лучи $B_{\text{макс}}$ и $B_{\text{мин}}$ проходят толщину дымчатого стекла δ один раз, а лучи паразитной подсветки ΔB — дважды (туда и обратно), тем самым поглощаясь значительно сильнее.

Контрастность без внешней подсветки

$$\beta_0 = \frac{\tau B_{\text{макс}}}{\tau B_{\text{мин}}} = \frac{B_{\text{макс}}}{B_{\text{мин}}}.$$

С учетом внешней подсветки

$$\beta_п = \frac{\tau B_{макс} + \tau^2 \Delta B}{\tau B_{мин} + \tau^2 \Delta B} = \frac{B_{макс} + \tau \Delta B}{B_{мин} + \tau \Delta B},$$

или

$$\beta_п = \frac{\frac{B_{макс}}{B_{мин}} + \tau \frac{\Delta B}{B_{мин}}}{1 + \tau \frac{\Delta B}{B_{мин}}} = \frac{\beta_0 + \tau \frac{\Delta B}{B_{мин}}}{1 + \tau \frac{\Delta B}{B_{мин}}}. \quad (8)$$

Для лучшего понимания формулы (8) примем, например, $\Delta B = B_{мин}$; тогда

$$\beta_п = \frac{\beta_0 + \tau}{1 + \tau}. \quad (8')$$

Так как на практике $\tau < 1$, а $\beta_0 > 10$, то $\tau \ll \beta_0$ и τ в числителе можно пренебречь, отчего формула еще упрощается:

$$\beta_п = \frac{\beta_0}{1 + \tau}. \quad (8'')$$

При $\tau \to 1$ (прозрачное стекло) $\beta_п \to \beta_0/2$, т. е. контрастность за счет подсветки падает вдвое; при $\tau \to 0$ («густое» дымчатое стекло) $\beta_п \to \beta_0$ т. е. на контрастность внешняя подсветка не влияет.

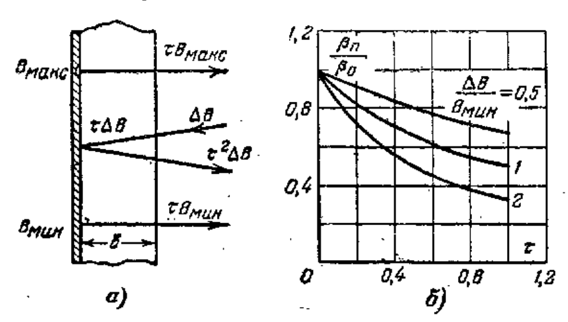


Рис. 14. Влияние внешней подсветки на контрастность телевизионного изображения.

а — схема прохождения лучей внешней подсветки; *б* — зависимость контрастности от коэффициента прозрачности для нескольких значений яркости внешней подсветки.

На рис. 14,*б* дан график относительного снижения контрастности за счет внешней подсветки, построенный на основании формулы (8). Практически τ не следует брать меньше 0,5, иначе сильно упадет яркость изображения. При $\tau = 0{,}5$ и $\Delta B = B_{мин}$ будем иметь $\beta_п = 0{,}67\beta_0$.

Из отечественных кинескопов дымчатое стекло, например, имеют кинескопы 35ЛК2Б и 43ЛК2Б, металлизация экрана осуществлена у кинескопов 43ЛК6Б и 53ЛК6Б.

6. ГРАДАЦИИ ЯРКОСТИ

Обычно изображение, передаваемое по телевидению, является полутеневым. Это означает, что кроме ярких и темных мест, соответствующих $B_{макс}$ и $B_{мин}$, в изображении еще имеется много промежуточных градаций яркости, так называемых полутеней. Наличие большого количества этих полутеней делает изображение более художественным, живым и сочным и увеличивает разборчивость объемности и очертаний. Поэтому правильная передача градаций яркости является важным фактором в создании высококачественного телевизионного изображения.

Бывают случаи, когда нет необходимости в передаваемом изображении иметь полный набор градаций яркости, когда можно обойтись только двумя крайними значениями яркости: $B_{макс}$ и $B_{мин}$. К таким случаям можно отнести, например, передачу надписей (черные буквы на светлом фоне), технических чертежей и пр. Но передачи из студии, передачи художественных фильмов и т. п. обязательно требуют хорошего воспроизведения полутеней.

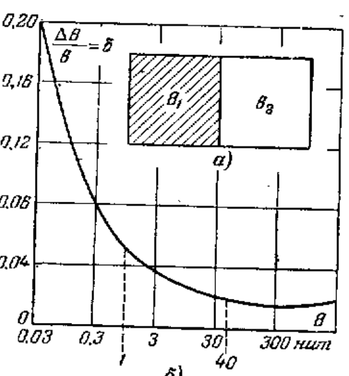


Рис. 15. Определение контрастной чувствительности глаза.

а — два соседних поля разной яркости; *б* — зависимость контрастной чувствительности от яркости.

Передача и воспроизведение большого числа градаций связаны с повышением требований к телевизионной аппаратуре. Поэтому существенно выяснить предельное число различимых градаций, превышение которого приводит только к усложнению аппаратуры без улучшения качества изображения. Как и во многих других случаях, прибором, определяющим разумную границу максимального числа градаций, является человеческий глаз.

Для того чтобы определить максимальное число градаций, надо найти тот порог, при котором человек замечает разницу в двух соседних значениях яркости. Представим себе два смежных светящихся поля (рис. 15,*а*). Яркость B_1 или B_2 мы можем изменять в желаемых пределах. Перед этими светящимися полями находится группа зрителей. В начале опыта $B_1 = B_2$. Затем, не меняя, например, яркость B_1, будем медленно изменять яркость B_2. Зрители независимо друг от друга, не сговариваясь, должны сообщить момент, когда каждый из них заметил, что B_2 стала отличаться от B_1. Таким образом определяется минимальная величина

$$\Delta B = |B_2 - B_1| = \frac{\Delta B_1 + \Delta B_2 + \ldots + \Delta B_n}{n},$$

при которой зритель замечает разницу в этих двух яркостях (здесь ΔB_n — индивидуальные показания зрителей, а n — число зрителей).

Подобные опыты проводились многократно, и они установили с очевидностью следующий существенный для практики факт: ми-

нимальная величина заметного на глаз приращения яркости ΔB зависит от величины начальной яркости B_1. Чем больше B_1, тем больше оказывается $\Delta B = |B_2 - B_1|$.

Поясним это обстоятельство примером. Телевизионный экран имеет яркость 40 *нт* (на белом). Для того чтобы было хотя бы чуть-чуть заметно увеличение (или уменьшение) этой яркости, ее нужно будет изменить на 0,8 *нт*, т. е. яркость в 40,8 или 39,2 *нт* будет на глаз едва заметно отличаться от яркости в 40 *нт*. Яркость лампы накаливания составляет $5 \cdot 10^6$ *нт*. Изменение этой яркости на 0,8 *нт* никак не будет заметно на глаз. Чтобы получить ощущение хотя бы небольшого изменения яркости, в этом случае ΔB должно составить $2{,}5 \cdot 10^5$ *нт*.

Экспериментами установлен следующий закон (закон Фехнера):

$$\frac{\Delta B}{B} = \delta \approx \text{const}, \qquad (9)$$

где ΔB — приращение яркости, едва заметное на глаз;
B — начальная яркость;
δ — величина, мало меняющаяся в широком диапазоне яркостей (она называется контрастной чувствительностью глаза).

На рис. 15,б представлен график зависимости контрастной чувствительности от яркости наблюдаемого источника. Для яркостей, имеющих место на экране телевизора (примерно от 40 до 1 *нт*), контрастная чувствительность меняется от 0,05 до 0,02 (т. е. в среднем $\delta \approx 0{,}03$).

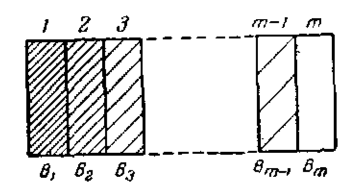


Рис. 16. К определению числа градаций яркости.

Чтобы подсчитать максимальное число различимых градаций яркости на экране кинескопа, представим себе изображение в виде полос с постепенно увеличивающейся яркостью (рис. 16), причем яркость каждой полосы отличается от соседней на минимальную величину ΔB, определяемую контрастной чувствительностью глаза δ.

Будем считать контрастность изображения $\beta = B_{\text{макс}}/B_{\text{мин}}$ заданной. Яркость первой полосы

$$B_1 = B_{\text{мин}},$$

второй полосы

$$B_2 = B_1 + \Delta B = B_1 + \delta B_1 = B_1(1+\delta),$$

третьей полосы

$$B_3 = B_2 + \Delta B = B_2 + \delta B_2 = B_2(1+\delta) = B_1(1+\delta)^2,$$

m-й полосы

$$B_m = B_1(1+\delta)^{m-1}.$$

Имея в виду, что $B_1 = B_{\text{мин}}$, а $B_m = B_{\text{макс}}$, получим:

$$\beta = \frac{B_{\text{макс}}}{B_{\text{мин}}} = (1+\delta)^{m-1},$$

откуда

$$m = \frac{\ln \beta}{\ln(1+\delta)} + 1.$$

При $\delta \ll 1$ (в нашем случае $\delta = 0{,}02 \div 0{,}05$) $\ln(1+\delta) \approx \delta$. Кроме того, связь между натуральным и десятичным логарифмом, определяется известным соотношением $\ln x = 2{,}3 \lg x$. Таким образом,

$$m = \frac{2{,}3 \lg \beta}{\delta} + 1. \qquad (10)$$

Максимальное число градаций яркости m, различимых глазом, оказывается прямо пропорциональным логарифму контрастности β и обратно пропорциональным контрастной чувствительности δ.

Приняв для телевидения $\beta = 10 \div 40$, а $\delta = 0{,}03$, получаем:

$$m = \frac{2{,}3 \lg(10 \div 40)}{0{,}03} = 78 \div 128,$$

т. е. в среднем около 100.

Таким образом, при самых благоприятных условиях (в отсутствие шумов, при идеальной линейности амплитудных характеристик телевизионного тракта и пр.) на экране телевизора можно было бы рассмотреть до ста градаций яркости. На самом же деле на практике вследствие несовершенства работы телевизионной аппаратуры число хорошо различимых градаций оказывается значительно меньшим, не превышающим примерно $m = 10$. Но хотя это число раз в десять меньше теоретического, практика показывает, что оно не является таким уж плохим. При десяти градациях яркости изображение оказывается контрастным, хорошо разборчивым и достаточно художественным. Ведь опытный художник, пользуясь всего тремя — пятью оттенками яркости, может создать вполне приемлемое изображение.

Мы до сих пор говорили о минимально заметном приращении яркости. Оказывается, что не только минимальное, но любое приращение яркости, вызывающее одинаковое приращение ощущения в сознании человека, пропорционально начальной яркости (закон Вебера):

$$\Delta S = \frac{\Delta B}{B}, \qquad (11)$$

где ΔB — любое приращение яркости;
B — начальная яркость;
ΔS — приращение ощущения.

Ощущение является психофизиологическим понятием и не может измеряться точной количественной мерой. Поэтому формула (11) носит качественный характер. Ее полезность заключается в том, что она указывает, как человек ощущает изменения яркости. Если же яркость изменяется на значительную величину, то изменение ощущения определяется по следующей формуле:

$$S - S_0 = \ln \frac{B}{B_0}. \qquad (12)$$

В формуле (12), называемой законом Вебера — Фехнера, S_0 — первоначальное ощущение яркости, S — ощущение после изменения яркости на произвольную величину, B_0 — первоначальное значение яркости, B — значение яркости после ее изменения. Таким образом, согласно закону Вебера — Фехнера ощущение S пропорционально логарифму яркости B.

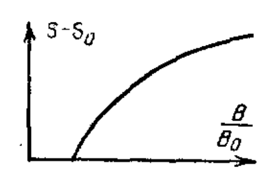


Рис. 17. График ощущения яркости (закон Вебера — Фехнера).

График зависимости $S=f(B)$, построенный на основании формулы (12), представлен на рис. 17. Этот график, в основном подтверждаемый практикой, показывает, что между яркостью и вызываемым ею в зрительном аппарате человека ощущением нет прямой пропорциональности. По мере увеличения яркости ощущение растет все медленнее и медленнее. Это замечательное свойство зрения играет большую роль в повседневной жизни человека. Поясним это обстоятельство примером.

Яркость, слабо различимая человеческим глазом, составляет примерно $B_{мин} \approx 0{,}1$ *нт*. Слепящая яркость, которую еще можно с трудом терпеть (нить лампы накаливания), $B_{макс} \approx 10^7$ *нт*. Таким образом, полный динамический диапазон видимых яркостей составит

$$\frac{B_{макс}}{B_{мин}} = \frac{10^7}{10^{-1}} = 10^8.$$

Было бы немыслимо такой диапазон яркостей (сто миллионов раз) уложить в сознании человека в случае прямой пропорциональности между ощущением и соответствующей ему яркостью. Особенность зрения, подчиняющаяся логарифмическому закону Вебера — Фехнера, как бы снижает этот гигантский диапазон в сознании человека. По формуле (12) ощущение меняется только в 18,4 раза:

$$\ln \frac{10^7}{10^{-1}} = 18{,}4.$$

Можно сказать, что закон Вебера — Фехнера подобен применению логарифмической бумаги при графическом изображении зависимостей, имеющих большой динамический диапазон.

7. АМПЛИТУДНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕЛЕВИЗИОННОГО ТРАКТА

На контрастность изображения существенно влияет форма амплитудной характеристики телевизионного тракта. В телевизионный тракт, считая от его входа до выхода, входят передающая трубка, видеоусилители телевизионного центра, модулятор передатчика, передатчик, передающая антенна, среда, приемная антенна, усилители высокой и промежуточной частоты приемника, первый и второй детекторы, видеоусилитель приемника и, наконец, приемная трубка. Как видим, на пути создания телевизионного изображения имеется большое количество звеньев, многие из которых могут внести свои нелинейные (и не только нелинейные) искажения сигнала.

В отличие, например, от звукового радиовещания нелинейные искажения телевизионного сигнала, правильно и рационально подобранные, могут не только не ухудшить, а наоборот, улучшить телевизионное изображение. Для объяснения этого явления обратимся к графику амплитудной характеристики телевизионного тракта (рис. 18), на котором изображена характеристика «от света до света», т. е. дана зависимость яркости экрана приемной трубки B_2 от яркости изображения B_1, создаваемого на фотокатоде передающей трубки.

Идеальная амплитудная характеристика изображается прямой линией (*0—1*, на рис. 18), для которой

$$\frac{B_2}{B_{2\,макс}} = \frac{B_1}{B_{1\,макс}}. \qquad (13)$$

Имеющуюся на практике нелинейность этой характеристики можно в общих чертах различать по «выпуклости книзу» (*0—2* на рис. 18) или по «выпуклости кверху» (*0—1/2*). Если амплитудная характеристика имеет изгиб с умеренной выпуклостью книзу, то изображение на экране телевизора от таких нелинейных искажений улучшится.

Для пояснения этого явления разобьем интервал от *0* до $B_{макс}$ как по оси B_1, так и по оси B_2 на три равных участках, которые условно назовем соответственно «черным», «серым» и «белым» (*Ч*, *С*, и *Б* на рис. 18). При идеально линейной характеристике *0—1* черному, серому и белому на фотокатоде передающей трубки будут в тех же относительных количествах соответствовать черное, серое и белое на экране кинескопа (точки *а*, *б* и *в*). При нелинейной характеристике *0—2* черному и серому на передаче будет соответствовать на приеме только черное (точка *а'*). Таким образом, нелинейная характеристика *0—2* приводит к сгущению теней, к затемнению серых «вялых» тонов. Это явление похоже на печатание с недодержанного негатива на контрастной фотобумаге, когда вялые участки изображения становятся более темными.

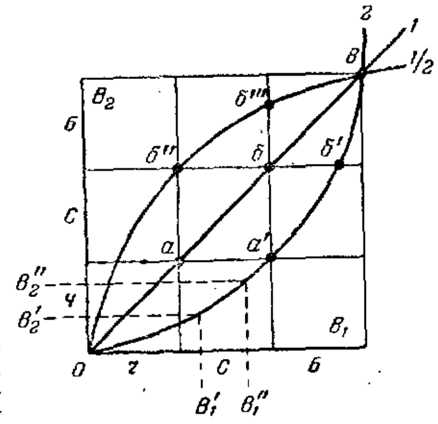


Рис. 18. Амплитудные характеристики телевизионного тракта.

Можно сказать, что нелинейная характеристика *0—2* производит «ретушь» телевизионного изображения, делая его более разборчивым и контрастным.

Вместе с тем следует иметь в виду, что при такой «электронной ретуши» в изображении может оказаться слишком много черного, появится ощущение, что изображение нарисовано как бы углем. На-

пример, для прямолинейной характеристики *0—1* черное на изображении занимает

$$\frac{Ч}{Ч+С+Б}=33\%;$$

для характеристики *0—2* оно будет

$$\frac{Ч+С}{Ч+С+Б}=67\%.$$

Поэтому, выбирая степень изгиба характеристики *0—2*, надо иметь чувство меры.

Нелинейные искажения при характеристике *0—1/2*, наоборот, приводят к существенному ухудшению качества изображения. В этом случае, как видно из рис. 18, черное в значительной части становится серым (точка *б″*), а серое переходит в белую область (точки *б″* и *б‴*). Изображение становится вялым, блеклым и неприятно светлым.

Характеристики *0—2* или *0—1/2* аналитически могут быть записаны следующим приблизительным соотношением:

$$\frac{B_2}{B_{2\,\text{макс}}}=\left(\frac{B_1}{B_{1\,\text{макс}}}\right)^{\gamma}. \qquad (14)$$

При $\gamma>1$ получается благоприятная характеристика *0—2*, а при $\gamma<1$ она приобретает изгиб выпуклостью кверху (характеристика *0—1/2*), ухудшающий качество изображения. Случай $\gamma=1$ соответствует линейной характеристике *0—1*. Практика показывает, что γ должна быть в пределах 1,5—2. При больших величинах γ «электронная ретушь» будет чрезмерной.

В телевидении часто вместо «амплитудной характеристики» используют термин «гамма-характеристика» (γ-характеристика). Таким образом, эти два названия по существу означают одно и то же.

Как упоминалось ранее, нелинейность γ-характеристики приводит к изменению контрастности принимаемого изображения. Дадим количественную оценку увеличения контрастности при $\gamma>1$. Контрастность определяется формулой

$$\beta=\frac{B_{\text{макс}}}{B_{\text{мин}}}.$$

Обозначим контрастность изображения на фотокатоде передающей трубки через β_1:

$$\beta_1=\frac{B_{1\,\text{макс}}}{B_{1\,\text{мин}}}.$$

На экране кинескопа вследствие нелинейности γ-характеристики будет существовать другая контрастность β_2:

$$\beta_2=\frac{B_{2\,\text{макс}}}{B_{2\,\text{мин}}}.$$

Исходя из формулы (14), получим:

$$\frac{B_{2\,\text{мин}}}{B_{2\,\text{макс}}}=\left(\frac{B_{1\,\text{мин}}}{B_{1\,\text{макс}}}\right)^{\gamma},$$

т. е.

$$\beta_2=\beta_1^{\gamma}. \qquad (15)$$

При $\gamma>1$ контрастность $\beta_2>\beta_1$.

Например, при $\beta_1=10$ и $\gamma=2$ контрастность $\beta_2=10^2=100$, т. е. имеет место десятикратное улучшение контрастности. Однако на практике такого увеличения контрастности получить не удается из-за влияния паразитных подсветок, рассмотренных ранее, а также из-за влияния шумов.

При $\gamma>1$ кроме общей контрастности β благоприятно увеличивается так называемая относительная контрастность соседних участков изображения. Относительная контрастность (определяемая в процентах)

$$K=\frac{B_б-B_м}{B_б}\,100\%, \qquad (16)$$

где $B_б$ и $B_м$ — яркости двух соседних участков изображения, причем $B_б>B_м$. При $B_м=0$ $K=100\%$, а при $B_б=B_м$ $K=0$.

Возьмем произвольно на оси B_1 два близких значения яркости B'_1 и B''_1 (рис. 18). Для этих значений относительная контрастность

$$K_1=\frac{B''_1-B'_1}{B''_1}=1-\frac{B'_1}{B''_1}.$$

Соответствующая относительная контрастность изображения на экране кинескопа будет:

$$K_2=\frac{B''_2-B'_2}{B''_2}=\frac{(B''_1)^{\gamma}-(B'_1)^{\gamma}}{(B''_1)^{\gamma}}=1-\left(\frac{B'_1}{B''_1}\right)^{\gamma}.$$

Так как $B'_1/B''_1<1$, а $\gamma>1$, то $K_2>K_1$. Например, при $B'_1/B''_2=0{,}8$ и $\gamma=2$ $K_1=1-0{,}8=0{,}2=20\%$, а $K_2=1-0{,}8^2=0{,}36=36\%$ (улучшение относительной контрастности на $36-20=16\%$).

Нелинейность амплитудной характеристики телевизионного тракта в целом вызывается в первую очередь нелинейностью характеристик передающей и приемной трубок, так как современная техника в состоянии обеспечить высокую линейность характеристик других элементов (усилителей, передатчика и др.).

Амплитудная характеристика типовой передающей трубки ЛИ7 (часто называемая световой характеристикой) дана на рис. 19,*а*. На

этом графике по осям координат отложены освещенность на фотокатоде E и ток полезного телевизионного сигнала i_c. Найдем значение коэффициента γ_1 для этой характеристики.

Зависимость $i_c = f(E)$, изображенную на рис. 19,*а*, представим аналитически следующим приблизительным выражением:

$$\frac{i_c}{i_{cm}} \approx \left(\frac{E}{E_m}\right)^{\gamma_1}. \tag{17}$$

Приняв $i_{cm} = 0{,}27$ *мка* и $E_m = 50$ *лк* и взяв еще одну точку на характеристике для $i_c = 0{,}19$ *мка* и $E = 25$ *лк*, получим:

$$\frac{0{,}19}{0{,}27} = \left(\frac{25}{50}\right)^{\gamma_1}, \text{ или } 0{,}707 = (0{,}5)^{\gamma_1},$$

откуда

$$\gamma_1 = \frac{\ln 0{,}707}{\ln 0{,}5} = 0{,}5.$$

Так как освещенность E на фотокатоде передающей трубки пропорциональна яркости на объекте B_1, выражение (17) можно заменить следующим соотношением:

$$\frac{i_c}{i_{cm}} = \left(\frac{B_1}{B_{1m}}\right)^{\gamma_1}. \tag{18}$$

Амплитудная характеристика типовой приемной трубки 35ЛК2Б (часто называемая модуляционной характеристикой) дана на рис. 19,*б*. Здесь по осям координат отложены яркость свечения экрана B_2 и напряжение сигнала u_c. Определим γ_2 для приемной трубки.

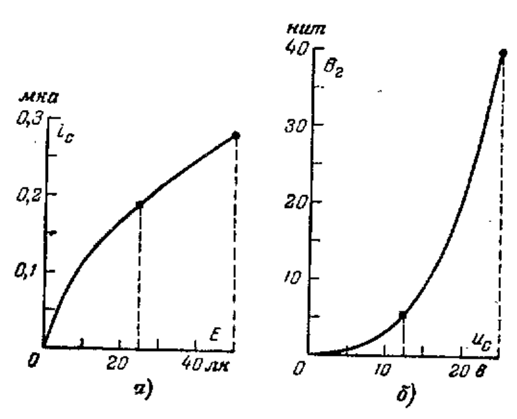


Рис. 19. Амплитудные характеристики телевизионных трубок.

а — световая характеристика передающей трубки ЛИ7; *б* — модуляционная характеристика приемной трубки 35ЛК2Б.

Характеристику на рис. 19,*б* выразим следующим приблизительным соотношением:

$$\frac{B_2}{B_{2m}} = \left(\frac{u_c}{u_{cm}}\right)^{\gamma_2}. \tag{19}$$

Приняв для одной точки на этой характеристике $B_{2m} = 40$ *нит* и $u_{cm} = 25$ *в*, а для другой точки $B_2 = 5$ *нит* и $u_c = 12{,}5$ *в*, получим:

$$\frac{5}{40} = \left(\frac{12{,}5}{25}\right)^{\gamma_2}, \text{ или } 0{,}125 = (0{,}5)^{\gamma_2},$$

откуда

$$\gamma_2 = \frac{\ln 0{,}125}{\ln 0{,}5} = 3.$$

Общий коэффициент $\gamma_{общ}$ для всего тракта в целом (при $\gamma = 1$ для усилителей, передатчика и пр.) определяется следующим образом.

Ток сигнала i_c, создаваемый передающей трубкой, и напряжение сигнала на управляющем электроде приемной трубки u_c пропорциональны:

$$\frac{i_c}{i_{cm}} = \frac{u_c}{u_{cm}}. \tag{20}$$

Подставив u_c/u_{cm} из выражения (20) в (19), получим:

$$\frac{B_2}{B_{2m}} = \left(\frac{i_c}{i_{cm}}\right)^{\gamma_2}.$$

Далее, на основании соотношения (18) будем иметь:

$$\frac{B_2}{B_{2m}} = \left[\left(\frac{B_1}{B_{1m}}\right)^{\gamma_1}\right]^{\gamma_2} = \left(\frac{B_1}{B_{1m}}\right)^{\gamma_1\gamma_2},$$

т. е.

$$\gamma_{общ} = \gamma_1\gamma_2. \tag{21}$$

В нашем примере $\gamma_1 = 0{,}5$, а $\gamma_2 = 3$; следовательно, $\gamma_{общ} = 0{,}5 \cdot 3 = 1{,}5$.

На практике для передающих трубок γ_1 различна и лежит ориентировочно в пределах 0,3—1. Для приемных трубок γ_2 также имеет разброс, лежащий обычно в границах 1,5—3,5. Поэтому $\gamma_{общ}$ может составлять:

$$\gamma_{общ.мин} = 0{,}3 \cdot 1{,}5 = 0{,}45;$$

$$\gamma_{общ.макс} = 1 \cdot 3{,}5 = 3{,}5.$$

Как уже указывалось ранее, хорошее качество изображения получается при $\gamma_{общ} = 1{,}5 \div 2$. В связи с этим возникает необходимость включения в телевизионный тракт устройства для регулирования γ в желательных пределах. Такое устройство называется гамма-корректором. Хотя в принципе безразлично, в каком месте тракта будет включен гамма-корректор, однако предпочтительнее, чтобы он нахо-

дился на телевизионном центре. Здесь легко обеспечить его квалифицированное обслуживание, ремонт и наладку. С этой точки зрения было бы нецелесообразным включать гамма-корректоры в каждый из многочисленных телевизионных приемников.

Идея работы схемы гамма-корректора основана на применении нелинейных элементов с таким расчетом, чтобы, регулируя их не-

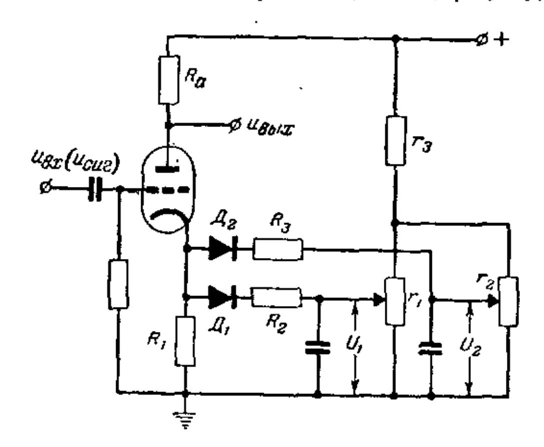


Рис. 20. Принципиальная схема гамма-корректора.

линейность, можно было изменять гамма-характеристику в желаемых пределах. Одна из таких распространенных схем в качестве примера дана на рис. 20.

В этой схеме величина отрицательной обратной связи меняется нелинейно в зависимости от мгновенного значения телевизионного сигнала, подаваемого на сетку лампы. В отсутствие этого сигнала диоды $Д_1$ и $Д_2$ в цепи катода лампы заперты напряжением U_1 и U_2. При определенной положительной величине сигнала $u_{сиг\,1}$ на сетке лампы сначала отпирается диод $Д_1$ и сопротивление в цепи катода уменьшается от первоначального значения $R_{к1}=R_1$ до

$$R_{к2}=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}.$$

При еще большем значении сигнала $u_{сиг2}$ отпирается и второй диод $Д_2$, а сопротивление в цепи катода лампы уменьшается еще значительнее:

$$R_{к3}=\frac{R_{к2}R_3}{R_{к2}+R_3}=\frac{\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}R_3}{\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}+R_3}=\frac{R_1R_2R_3}{R_1R_2+R_1R_3+R_2R_3}.$$

Коэффициент усиления каскада на пентоде с сопротивлением в катоде, не зашунтированном емкостью, определяется выражением

$$K=\frac{u_{вых}}{u_{вх}}=S_dR_a, \qquad (22)$$

где $S_d=S\frac{1}{1+SR_к}$ — динамическая крутизна (зависимость дана на рис. 21, *а*);

$R_а$ — сопротивление в цепи анода;
$R_к$ — сопротивление в цепи катода;
S — крутизна (статическая) сеточной характеристики лампы.

Таким образом, наличие в цепи катода сопротивления $R_к$ приводит к уменьшению усиления. Если учесть, что $R_к$ в схеме на рис. 20 уменьшается с увеличением сигнала на сетке лампы, то коэффициент усиления растет с увеличением этого сигнала (рис. 21,*б*).

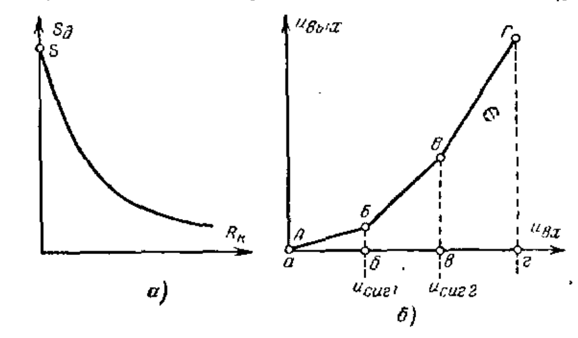


Рис. 21. Рабочие характеристики гамма-корректора.

а — зависимость динамической крутизны от катодного сопротивления; *б* — амплитудная характеристика.

Конечно, ломаная линия *АБВГ*, изображающая зависимость $u_{вых}$ от $u_{вх}$, только весьма приближенно может быть принята за параболу вида $u_{вых}=ku^{\gamma}_{вых}$. Чем больше диодов в цепи катода лампы, тем точнее можно создать это приближение.

Потенциометры r_1 и r_2 служат для подбора напряжений задержки U_1 и U_2, т. е. в конечном счете для регулировки величины γ. Кроме того, γ изменяется при изменении сопротивления R_1, R_2 и R_3.

Например, для $\gamma\approx 2$ можно получить расчетные формулы, исходя из следующих соображений.

Участок *аг* (на рис. 21,*б*) разбиваем на три равные части: *аб*, *бв* и *вг*. Коэффициенты усиления на этих участках определяются следующими формулами:

$$K_1=\frac{SR_а}{1+SR_{к1}}; \quad K_2=\frac{SR_а}{1+SR_{к2}}; \quad K_3=\frac{SR_а}{1+SR_{к3}}. \qquad (23)$$

Зададимся величиной $R_{к2}$. Исходя из того, что $\gamma=2$ и точки ломаной линии *АБВГ* должны лежать на параболе $u_{вых}=ku^2_{вх}$, из соотношений (23) можно получить следующие расчетные формулы:

$$R_{к1}=3R_{к2}+2\,\frac{1}{S}\,; \tag{24}$$

$$R_{к3}=\frac{3}{5}\,R_{к2}-\frac{2}{3}\,\frac{1}{S}\,. \tag{25}$$

Проиллюстрируем применение приведенных формул примером. Дано: $S=10$ *ма/в* (лампа 6Ж5П); $R_{к2}=1$ *ком*; $R_а=1$ *ком*; $\gamma=2$. Требуется найти K_1, K_2, K_3 и соответствующие им $R_{к1}$ и $R_{к3}$.

$$R_{к1}=3R_{к2}+2\,\frac{1}{S}=3\cdot1+2\,\frac{1}{10}=3{,}2\ ком;$$

$$R_{к3}=\frac{3}{5}\,R_{к2}-\frac{2}{3}\,\frac{1}{S}=\frac{3}{5}\cdot1-\frac{2}{3}\cdot\frac{1}{10}=0{,}55\ ком;$$

$$K_1=\frac{SR_а}{1+SR_{к1}}=\frac{10\cdot1}{1+10\cdot3{,}2}=0{,}3;$$

$$K_2=\frac{SR_а}{1+SR_{к2}}=\frac{10\cdot1}{1+10\cdot1}=0{,}9;$$

$$K_3=\frac{SR_а}{1+SR_{к3}}=\frac{10\cdot1}{1+10\cdot0{,}55}=1{,}5.$$

Если потребуется, чтобы амплитудная характеристика гамма-корректора имела выпуклость вверх (т. е. $\gamma<1$), то диоды в схеме на рис. 20 должны быть включены с обратной полярностью. Следует также изменить полярность напряжений задержки.

Часто телезритель, даже не подозревая об этом, пользуется своеобразной гамма-коррекцией, устанавливая режим работы кинескопа с отсечкой тока луча. Этот режим осуществляется снижением средней яркости экрана путем увеличения отрицательного смещения на управляющем электроде трубки и соответствующим увеличением коэффициента усиления сигнала.

Например, в режиме 1 ($U_{ср1}$ на рис. 22) яркость $B_{мин}$ кажется на глаз слишком светлой и контрастность $\beta=B_{макс}/B_{мин}$ малой. При перемещении рабочей точки влево, когда $|U_{ср2}|<|U_{ср1}|$, темные места еще более потемнеют, $B_{мин}$ снизится. Получение той же яркости $B_{макс}$ осуществляется увеличением размаха телевизионного сигнала на управляющем электроде кинескопа.

Не следует думать, что в режиме 2 ($U_{ср2}$ на рис. 22) можно добиться, чтобы $B_{мин}=0$, т. е. иметь контрастность $\beta\to\infty$. Явление ореола, внутренней подсветки и влияние шумов приводят к неизбежному условию $B_{мин}\neq0$.

Часто при описанной выше регулировке за линию отсечки может уйти часть телевизионного сигнала (участок $\alpha\beta$ на рис. 22), т. е. может пропасть одна или несколько градаций яркости на черных участках. Таким образом возникает своеобразное противоречие, заключающееся в том, что при повышении общей контрастности число градаций яркости, воспроизводимое на экране телевизора, будет меньше передаваемого телецентром.

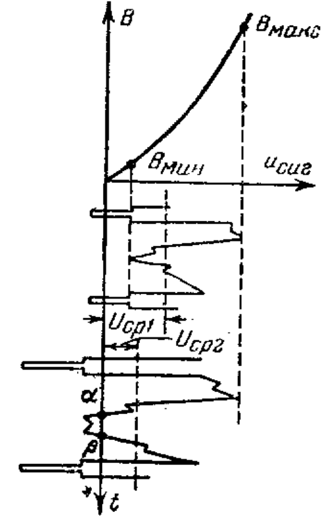


Рис. 22. Увеличение контрастности изображения подбором рабочей точки на модуляционной характеристике кинескопа.

8. ВЛИЯНИЕ ШУМОВ НА КОНТРАСТНОСТЬ

Быстрые и хаотические (не имеющие регулярного ритмического характера) токи или напряжения, возникающие во многих местах телевизионного тракта (в передающих трубках, лампах, сопротивлениях), усиливаются вместе с телевизионным сигналом и создают существенные помехи приему телевидения, сильно снижающие качество изображения. Эти беспорядочные помехи принято называть «шумами», так как впервые их влияние и причины возникновения изучались в звуковом радиовещании, где эти помехи на самом деле воспринимались на слух как шумы.

Хотя источников шума в телевизионной аппаратуре много, но их отрицательное влияние на качество изображения не равноценно. Особенно сильно сказываются шумы, возникающие в следующих элементах тракта: в передающей телевизионной трубке, во входном сопротивлении и первой лампе камерного усилителя[1], во входных цепях телевизионного приемника.

Современная передающая телевизионная трубка является сложным электронным прибором, в котором используется несколько видов эмиссии электронов. Развертывающий электронный луч берет свое начало из нагретого катода (термоэмиссия). Передаваемое изображение проектируется на фотокатод, откуда под действием света вылетают фотоэлектроны (фотоэмиссия). Наконец, для увеличения тока сигнала используется вторичноэлектронная эмиссия.

[1] Камерный (или предварительный) усилитель — первый усилитель телевизионного тракта, находящийся в камере и усиливающий сигнал, получаемый непосредственно от передающей трубки.

Все эти виды эмиссии в передающей трубке вместе с полезным сигналом создают значительные уровни шумов. Можно только в среднем считать, что при неизменных внешних условиях (средней температуре, питающих напряжениях, средней освещенности и пр.) эмиссия электронов является постоянной величиной. На самом деле в различные моменты времени вылетает то меньше, то больше электронов. Таким образом, на среднюю величину тока (или напряжения) эмиссии накладывается хаотически изменяющаяся переменная составляющая (рис. 23).

Как показано на рис. 24, сигнал, возникающий в передающей трубке, подается на входное сопротивление $R_{вх}$ камерного усилителя. В этом сопротивлении, как и во всяком другом активном со-

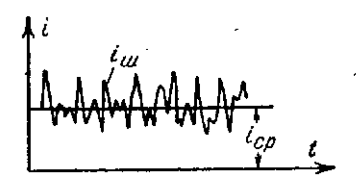


Рис. 23. Наложение тока шума $i_ш$ на средний ток $i_{ср}$.

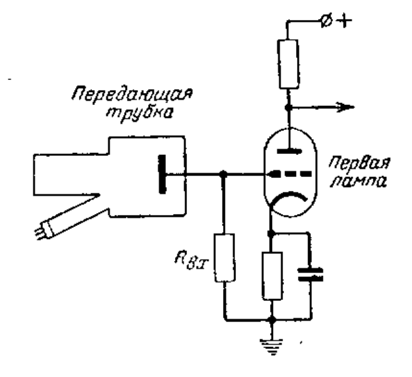


Рис. 24. Упрощенная принципиальная схема входной цепи камерного усилителя.

противлении, возникает хаотическое шумовое напряжение, обязанное своим происхождением тепловому беспорядочному движению электронов внутри сопротивления. Значительный шум создается также первой лампой камерного усилителя. Электроны, вырывающиеся из термокатода этой лампы, несут значительную шумовую составляющую анодного тока. Наконец, входная цепь (антенна, фидер, преселектор) приемника воспринимает шумовые напряжения от многочисленных природных и искусственных источников радиоизлучений.

Помехи, попадающие на экран телевизора вместе с полезным сигналом, вызывают, во-первых, снижение контрастности изображения и уменьшение числа градаций яркости; во-вторых, они ухудшают четкость изображения (что будет пояснено в следующей главе).

Снижение контрастности вследствие действия шумов объясняется появлением светлой «вуали» на изображении, равноценной действию паразитной подсветки. Вуаль образуется из-за детектирования напряжения помех приемной телевизионной трубкой. Это неприятное явление (детектирование шумов) имеет место как при линейной ($\gamma=1$), так и при нелинейной ($\gamma>1$) амплитудной характеристике кинескопа.

Для пояснения этого явления рассмотрим сначала случай линейной характеристики (рис. 25). Напряжение шумов $u_ш$, попав на управляющий электрод кинескопа вместе с полезным сигналом $u_с$, не вызовет изменения средней яркости $B_с$, так как за счет инер-

ционности зрения и послесвечения экрана переменная «шумовая» яркость усредняется, не прибавляя к яркости сигнала $B_с$ дополнительной величины (рис. 25,*а*). Однако при небольшом напряжении сигнала (на темном месте изображения) в случае $u_с<u_ш$ некоторые импульсы шума (заштрихованные на рис. 25,*б*) уйдут за линию от-

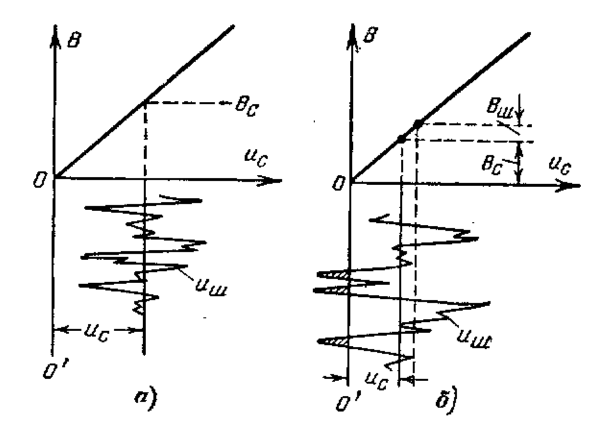


Рис. 25. Возникновение вуали на экране кинескопа из-за детектирования шумов.

а — при большом значении напряжения сигнала детектирования не происходит; *б* — детектирование имеет место при малом напряжении сигнала.

сечки *00'*, т. е. будет происходить детектирование шумового напряжения, отрицательные и положительные импульсы шума не будут в сознании зрителя усредняться до нуля. В результате этого появится дополнительная средняя яркость $B_ш$, подсвечивающая изображение особенно заметно на темных местах. Это и приводит к возникновению вуали — светлой дымки на темных участках изображения.

Контрастность изображения, определяемая обычной формулой, в случае детектирования шума становится меньше:

$$\beta_ш=\frac{B_{макс}}{B_{мин}+B_ш}<\beta=\frac{B_{макс}}{B_{мин}},$$

где $B_{макс}$ и $B_{мин}$ — максимальная и минимальная яркость, создаваемая полезным сигналом, а $B_ш$ — средняя яркость, возникающая за счет детектирования шума (в этой формуле к $B_{макс}$ не прибавляется $B_ш$, так как при большом сигнале $u_с$, вызывающем $B_{макс}$, дополнительная яркость $B_ш=0$ (рис. 25,*а*).

Для количественных подсчетов снижения контрастности из-за шума надо определить понятие «амплитуды шумового напряжения $U_ш$». Однако это сделать затруднительно, так как пики шумового напряжения не имеют определенной величины, они в течение времени хаотически изменяются.

Многочисленные исследования характера шумов, источниками которых являются рассмотренные ранее причины, установили, что, во-первых, спектр мощности g шумового напряжения практически равномерен во всем телевизионном диапазоне, начиная от самых низких и кончая самыми высокими частотами (рис. 26,*а*). Во-вторых, распределение амплитуд шумовых импульсов таково, что чем больше амплитуда, тем реже она встречается (так называемый «нормальный закон распределения», рис. 26,*б*).

Процентное содержание числа импульсов в зависимости от амплитуды этих импульсов определяется следующим выражением:

$$p = e^{-\left(\frac{u_{ш}}{u_{эф}}\right)^2}, \qquad (26)$$

где $u_{ш}$ — амплитуда (размах) импульсов;
p — относительное число импульсов с этой амплитудой $u_{ш}$;
$u_{эф}$ — постоянная величина, смысл которой выясняется ниже.

Таким образом, понятие амплитуды шума становится неопределенным. Поэтому вместо амплитуды пользуются «эффективным напряжением шума» $u_{эф}$, которое определяется следующим образом. Если напряжение шума приложить к какому-нибудь нешумящему активному сопротивлению R, то энергия шума вызовет нагревание этого сопротивления, т. е. в нем будет расходоваться определенная мощность. Отключив затем источник шума от сопротивления и подключив вместо него источник постоянного напряжения, можно подобрать его величину так, что мощность рассеяния в сопротивлении будет такой же, как и при подаче шумового напряжения. Таким образом,

$$P_{ш} = P_{п} = \frac{u_{эф}^2}{R},$$

где $P_{ш}$ — мощность, поглощаемая сопротивлением R в случае подачи шумового напряжения;
$P_{п}$ — мощность, поглощаемая сопротивлением R в случае подачи постоянного напряжения;
$u_{эф}$ — постоянное напряжение (эффективное), эквивалентное шумовому напряжению по мощности рассеяния.

Пользуясь основными характеристиками шумового напряжения — распределением мощности шума по спектру частот (рис. 26,*а*)

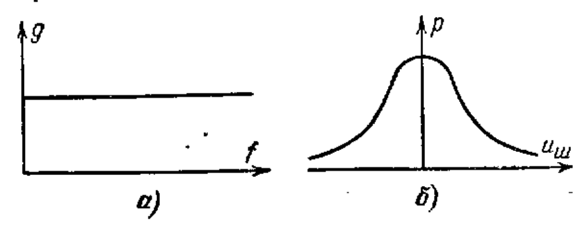


Рис. 26. Характеристики шумового сигнала.
а — распределение мощности шума по спектру частот; *б* — процентное содержание различных амплитуд шумового напряжения.

и распределением шума по амплитудам (рис. 26,*б*), можно вычислить эффективное напряжение шума, а затем найти зависимость средней яркости $B_{ш}$, возникающей из-за детектирования шума кинескопом. Однако для этих вычислений нужно быть знакомым с основами математической теории вероятностей и интегральным исчислением. Мы пропустим промежуточные выкладки и познакомим читателя с конечными результатами.

Рассмотрим сначала случай линейной амплитудной характеристики ($\gamma=1$). Средняя яркость свечения экрана B при наличии сигнала и шума определяется выражением

$$B = B_{ш} + B_{с}, \qquad (27)$$

причем

$$B_{ш} = kU_{ш} f_1\left(\frac{u_{с}}{U_{ш}}\right), \qquad (28)$$

$$B_{с} = ku_{с}\varphi_1\left(\frac{u_{с}}{U_{ш}}\right), \qquad (29)$$

Рис. 27. Вспомогательный график, позволяющий определить величину шумовой вуали для различных отношений сигнал/шум.

где k — коэффициент наклона амплитудной характеристики яркости в зависимости от напряжения сигнала (рис. 25, *а*);
$U_{ш} = u_{эф}$ — эффективное напряжение шума;
$u_{с}$ — напряжение сигнала;
$f_1\left(\frac{u_{с}}{U_{ш}}\right)$ и $\varphi_1\left(\frac{u_{с}}{U_{ш}}\right)$ — функции, определяемые явлением детектирования.

Математическое выражение для этих функций достаточно сложно (только в форме интегралов). На рис. 27 приводятся графики этих функций.

В случае отсутствия шума яркость свечения экрана меняется по закону

$$B = B_{с} = ku_{с}. \qquad (30)$$

Таким образом, $\varphi_1\left(\frac{u_{с}}{U_{ш}}\right)$ в формуле (29) является поправкой коэффициента наклона k из-за действия шумов. Из графика на рис. 27 следует, что только при превышении сигнала над шумом более чем вдвое можно считать $\varphi_1\left(\frac{u_{с}}{U_{ш}}\right) \approx 1$; тогда становится справедливой формула (30). При $u_{с}/U_{ш} < 2$ коэффициент k как бы уменьшается. В начале координат ($u_{с}=0$) значение k падает вдвое,

т. е. $\varphi_1(0) = 0{,}5$. Это обстоятельство приводит к „подавлению" слабых сигналов шумом.

Как видно из графика на рис. 27, превышение сигнала над шумом более чем в 3 раза приводит к исчезновению паразитной подсветки ($B_ш = 0$). Таким образом, светлая шумовая вуаль существует только для темных сигналов, для которых $u_c/U_ш < 3$.

Наибольшая подсветка создается на самых «черных» (слабых) сигналах, так как $f_1(0)$ достигает максимальной величины, равной 0,4.

Контрастность изображения $\beta_ш$ при наличии шумовой вуали можно подсчитать следующим образом:

$$\beta_ш = \frac{B_{макс}}{B_{мин} + B_ш}, \tag{31}$$

где $B_{макс}$ и $B_{мин}$ — максимальная и минимальная яркость на экране, вызываемая полезным сигналом;

$B_ш$ — яркость шумовой вуали.

Так как при $u_c \to 0$ яркость $B_{мин} \ll B_ш$, можно считать

$$\beta_ш \approx \frac{B_{макс}}{B_ш} = \frac{ku_{c.макс}}{kU_ш f_1(0)} = \frac{u_{c.макс}}{0{,}4U_ш} = 2{,}5\frac{u_{c.макс}}{U_ш}. \tag{32}$$

Например, при отношении сигнал/шум

$$\frac{u_{c.макс}}{U_ш} = 20, \quad \beta_ш = 2{,}5 \cdot 20 = 50.$$

Напомним, что темные места изображения, кроме шумовой вуали, подсвечиваются другими паразитными явлениями (ореолом, внутренней подсветкой). Найдем выражение для контрастности изображения при наличии нескольких факторов подсветки (например, двух). Напомним также, что контрастность без подсветки

$$\beta = \frac{B_{макс}}{B_{мин}}.$$

Имеются два источника паразитной подсветки с яркостью B_1 и B_2. Контрастность при наличии только одного из этих источников при условии $B_{мин} \ll B_1$ и $B_{мин} \ll B_2$ составила бы:

$$\beta_1 = \frac{B_{макс}}{B_1}; \quad \beta_2 = \frac{B_{макс}}{B_2}.$$

Общая контрастность (при наличии обоих источников) составит:

$$\beta_{общ} = \frac{B_{макс}}{B_{мин} + B_1 + B_2 + \ldots} = \frac{1}{\frac{B_{мин}}{B_{макс}} + \frac{B_1}{B_{макс}} + \frac{B_2}{B_{макс}} + \ldots} =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{\beta} + \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2} + \ldots};$$

$$\frac{1}{\beta_{общ}} = \frac{1}{\beta} + \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2} + \ldots \tag{33}$$

Формула (33) аналогична формуле, определяющей полное сопротивление (или проводимость) нескольких параллельно соединенных сопротивлений. Например, для $B_{мин} \to 0$ и двух источников подсветки

$$\beta_{общ} = \frac{\beta_1\beta_2}{\beta_1 + \beta_2}. \tag{34}$$

Пусть, например, только из-за шумовой вуали $\beta_ш = 50$ и только из-за ореола $\beta_1 = 30$. Тогда общая контрастность

$$\beta_{общ} = \frac{\beta_ш\beta_1}{\beta_ш + \beta_1} = \frac{50 \cdot 30}{50 + 30} \approx 19.$$

Шумы, попадающие вместе с сигналом на управляющий электрод приемной трубки, портят также и относительную контрастность, т. е. различимость по яркости двух соседних участков изображения. Для пояснения этого обратимся к рис. 28. На нем представлен скачок яркости ΔB между двумя соседними участками изображения (например, вдоль строки). В отсутствие шума относительная контрастность этих участков

$$K = \frac{\Delta B}{B_{c2}} = \frac{B_{c2} - B_{c1}}{B_{c2}}. \tag{35}$$

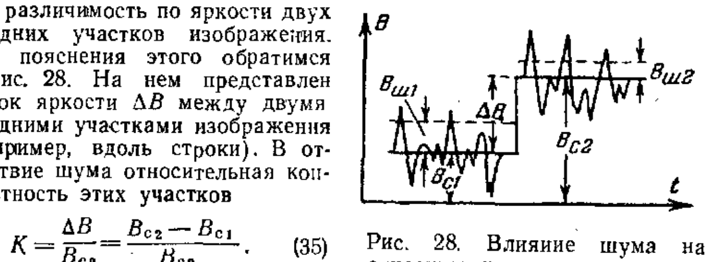


Рис. 28. Влияние шума на относительную контрастность телевизионного изображения.

Вследствие детектирования шума кинескопом появится шумовая вуаль $B_{ш1}$ и $B_{ш2}$, причем согласно рис. 25 значение $B_{ш2} < B_{ш1}$. Относительная контрастность при наличии шума

$$K_ш = \frac{(B_{c2} + B_{ш2}) - (B_{c1} - B_{ш1})}{B_{c2} + B_{ш2}} =$$

$$= \frac{(B_{c2} - B_{c1}) - (B_{ш1} - B_{ш2})}{B_{c2} + B_{ш2}}. \tag{36}$$

Сравнивая выражения (35) и (36) мы видим, что во втором случае (при наличии шума) в формуле для относительной контрастности уменьшается числитель и увеличивается знаменатель, т. е. по этим двум причинам

$$K_ш < K.$$

Пример. Скачок яркости происходит на темных участках изображения, для которых $\frac{u_c}{U_ш} = 1$, $B_{c1} = 3$ *нт* и $B_{c2} = 3{,}3$ *нт.* Надо определить снижение относительной контрастности из-за влияния шума.

1. Относительная контрастность в отсутствие шума

$$K = \frac{B_{c2} - B_{c1}}{B_{c2}} = \frac{3{,}3 - 3}{3{,}3} = 0{,}091 = 9{,}1\%.$$

2. Определим яркостные составляющие шума $B_{ш1}$ и $B_{ш2}$. Для $\frac{u_{c1}}{U_ш}=1$ по графику на рис. 27 находим $f_1=24$ и $\varphi_1=0{,}85$. Скачок яркости в отсутствие шума, как мы уже знаем, составляет 9,1% Таким образом, и отношение $\frac{u_c}{U_ш}$ увеличивается на 9,1%, т. е. $\frac{u_{c2}}{U_ш}=1{,}09\approx1{,}1$. По графику на рис. 27 для такого соотношения $f_1=0{,}21$ и $\varphi_1=0{,}86$. Из выражений (28) и (29) получаем:

$$B_{ш1}=B_{c1}\frac{U_ш}{u_{c1}}\frac{f_1}{\varphi_1}=3\cdot1\,\frac{0{,}24}{0{,}85}=0{,}85\ \text{нт};$$

$$B_{ш2}=B_{c2}\frac{U_ш}{u_{c2}}\frac{f_1}{\varphi_1}=3{,}3\cdot\frac{1}{1{,}1}\,\frac{0{,}21}{0{,}86}=0{,}736\ \text{нт}.$$

3. Относительная контрастность соседних участков изображения при наличии шумов

$$K_ш=\frac{(B_{c2}-B_{c1})-(B_{ш1}-B_{ш2})}{B_{c2}+B_{ш2}}=\frac{(3{,}3-3)-(0{,}85-0{,}736)}{3{,}3+0{,}736}=$$

$$=0{,}046=4{,}6\%,$$

т. е. имеет место двукратное снижение относительной контрастности $\left(\frac{K_ш}{K}\approx0{,}5\right)$.

Обратившись к рис. 15, заключаем, что $K_ш=4{,}6\%$, при яркости около 3 *нт* примерно равна контрастной чувствительности глаза $\delta\approx4\%$. Таким образом, скачок яркости в нашем примере, хорошо видимый в отсутствие шумов, будет завуалирован шумами настолько, что его уже нельзя различить на изображении.

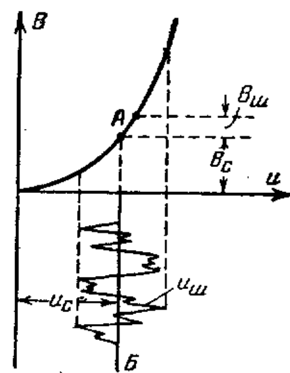


Рис. 29. Возникновение шумовой вуали в случае нелинейной модуляционной характеристики кинескопа.

Рассмотрим теперь кратко детектирующий эффект амплитудной характеристики кинескопа, если эта характеристика нелинейна. Выберем для удобства рассуждений $\gamma=2$.

В отличие от случая $\gamma=1$, когда мешающее действие шума прекращается при $\frac{u_c}{U_ш}>3$, для нелинейной характеристики шумовая вуаль будет возникать при любом отношении $\frac{u_c}{U_ш}$. В этом случае детектирование происходит не только из-за отсечки напряжения шума, но и вследствие изгиба амплитудной характеристики на всем ее протяжении. Например, при $U_ш<u_c$ (рис. 29) отсечка напряжения шума практически не наблюдается. Но из-за изгиба характеристики в точке A (как и во всех других точках) влево от линии $AБ$ пики шумовых импульсов яркости сплющиваются, а вправо от этой линии вытягиваются. Это и приводит к появлению шумовой вуали $B_ш$.

Для очень грубых прикидок, с целью упрощения объяснений примем, что шум состоит из синусоиды, имеющей амплитуду $U_ш$:

$$u_ш=U_ш\sin\omega t.$$

Амплитудная характеристика на рис. 29 определяется выражением

$$B=ku^{\gamma}. \tag{37}$$

При $\gamma=2$

$$B=ku^2. \tag{38}$$

Напряжение на управляющем электроде кинескопа состоит из полезного сигнала и шума:

$$u=u_c+u_ш. \tag{39}$$

Подставим выражение (39) в (38). Тогда

$$B=k(u_c+u_ш)^2=ku_c^2+ku_ш^2+2ku_cu_ш,$$

или

$$B=ku_c^2+kU_ш^2\sin^2\omega t+2ku_cU_ш\sin\omega t.$$

Из основ тригонометрии известно, что $\sin^2\alpha=\frac{1}{2}-\frac{1}{2}\cos2\alpha$.

Используя это, получим:

$$B=ku_c^2+k\frac{U_ш^2}{2}-k\frac{U_ш^2}{2}\cos2\omega t+2ku_cU_ш\sin\omega t. \tag{40}$$

В этом выражении третий и четвертый члены не содержат постоянной составляющей. Вследствие усредняющего действия зрения и послесвечения люминофора они не вызовут увеличения яркости экрана. Первый член в этом выражении определяет яркость, создаваемую полезным сигналом, а второй член — яркость шумовой вуали:

$$B_c=ku_c^2;$$

$$B_ш=\frac{k}{2}U_ш^2.$$

При $\gamma=2$, так же как и при $\gamma=1$, наличие шумов приводит к существенному снижению как общей, так и относительной контрастности.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ЧЕТКОСТЬ

9. ЧЕТКОСТЬ ТЕЛЕВИЗИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Четкость, являющаяся важнейшим качеством изображения, пожалуй даже более важным, чем контрастность, выражает способность телевизионной системы воспроизводить мельчайшие детали изображения и резкие переходы яркости [1]. Недостаточная четкость приводит к неприятному ощущению дефокусировки, размытости изображения. Передаваемые по телевидению лица мелким и средним планом становятся неузнаваемыми, неразборчивыми.

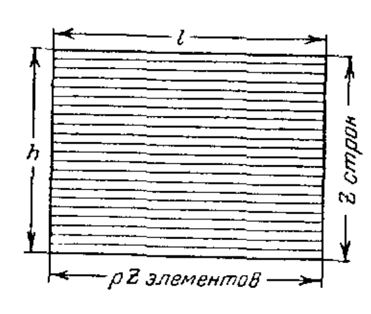


Рис. 30. К определению числа элементов разложения на растре.

Часто понятие четкости подразделяют на детальность — воспроизведение мелких деталей и резкость — воспроизведение резких переходов (скачков) яркости. Существуют радиотехнические приемы, позволяющие независимо влиять только на детальность или только на резкость. Однако в обычных элементах телевизионного тракта улучшение или ухудшение воспроизведения мелких деталей сопровождается соответственным улучшением или ухудшением передачи скачков яркости. Поэтому только в редких случаях приходится подразделять четкость на детальность и резкость.

Воспроизведение на телевизионном изображении мелких деталей и резких переходов связано в первую очередь с числом элементов разложения N, принятым в телевидении. При заданном формате $p=\frac{l}{h}$, где l — длина изображения, а h — его ширина (рис. 30), число элементов разложения однозначно связано с числом его строк Z:

$$N = pZZ = pZ^2. \qquad (41)$$

Очевидно, что наибольшее число мелких деталей составляет $N/2$, так как между белой деталью должен быть черный промежуток.

В отечественном стандарте $p=4/3$, а $Z=625$ строк. Поэтому

$$N = \frac{4}{3}\cdot 625^2 = 520\,832 \text{ элементам.}$$

---

[1] Применительно только к телевизионной системе часто вместо четкости говорят о разрешающей способности. Таким образом, четкость является более широким понятием, включающим в себя разрешающую способность не только телевизионной аппаратуры, но также и разрешающую способность глаза.

Эта подсчитанная величина N является идеальной в том смысле, что при ее подсчете не учитывалось пропадание некоторой части строк во время обратного хода луча по вертикали (перемещение луча снизу изображения кверху), составляющего около 8% всего времени развертки. Таким образом, число активных строк, создающих изображение, оказывается несколько меньше ($Z_{акт}=0{,}92\,Z$) и

$$N_{акт} = p\,(0{,}92)^2\,Z = 446\,000 \text{ элементов.}$$

Поэтому предельное число мелких черных (и чередующихся с ними белых) деталей составит:

$$\frac{N_{акт}}{2} = 223\,000.$$

Числом $N_{акт}$ можно было бы количественно характеризовать предельно достижимую четкость телевизионного изображения. Однако более удобно количественной мерой предельной четкости считать число строк стандартного разложения. Так можно сделать потому, что число строк и элементов связаны однозначно формулой (41) и при необходимости, зная число строк, всегда можно вычислить активное число элементов. Так, например, раньше (до 1950 г.) четкость советского телевидения составляла 343 строки, а сейчас эта четкость достигла 625 строк.

Возникает вопрос, какое число строк требуется для воспроизведения удовлетворительного по четкости изображения? На этот вопрос нельзя ответить однозначно. Требуемое число строк зависит от характера передаваемого изображения, от его «сложности», т. е. степени насыщенности средними и мелкими деталями, резкими перепадами яркости. Важное значение имеет и тот факт, каким планом (мелким, средним или крупным) снимается телевизионной камерой передаваемый объект.

Для ориентировки в табл. 2 приводятся некоторые данные, взятые из практики (четкость изображения в этой таблице оценивается на «удовлетворительно»).

Таблица 2

Удовлетворительная четкость изображения

Передаваемое изображение	Минимально необходимое число строк
Лицо крупным планом	120—150
2—3 человека во весь рост	250—300
Большое количество людей (хор, публика на стадионе и пр.)	450—650

Так как по телевидению возможны передачи самых разнообразных изображений, в том числе и мелкоструктурных (вроде публики на стадионе), то при разработке радиовещательной телевизионной системы следует ориентироваться на возможно большее число

460-2

строк. Однако увеличение их приводит к значительному повышению требуемой полосы частот телевизионного сигнала, что приводит в свою очередь к значительным усложнениям телевизионной техники.

Можно сказать, что развитие телевидения за последние 30 лет в основном сводилось к постепенному увеличению числа строк разложения (для получения лучшей четкости) и в связи с этим к решению инженерных и теоретических проблем по созданию соответствующей аппаратуры. Отметим, что в 30-х годах в нашей стране существовала опытная вещательная телевизионная система с 30 строками разложения (механическое телевидение). При этом требуемая полоса частот составляла примерно 6 000 *гц*. В 1937 г. в Москве стала действовать электронная телевизионная система с 343 строками и полосой частот порядка 1 500 000 *гц*. Сейчас в СССР используется телевизионный стандарт разложения в 625 строк с полосой частот около 5 000 000 *гц*.

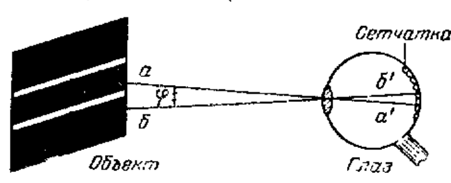


Рис. 31. Схема определения разрешающей способности (остроты зрения глаза).

Являются ли 625 строк разложения разумным пределом или имеет смысл улучшать четкость путем увеличения числа строк, несмотря на усложнение телевизионной аппаратуры? Решение этого вопроса связано со свойствами нашего глаза и в первую очередь с так называемой разрешающей силой или остротой зрения.

Светочувствительная поверхность глаза (сетчатка), на которую проецируется изображение, состоит из отдельных элементов — колбочек и палочек. В середине сетчатки находится «желтое пятно» (область наилучшего зрения). Здесь от каждого светочувствительного элемента отходит зрительный нерв в головной мозг.

Для определения остроты зрения пользуются объектом в виде двух светлых полосок (или точек) на темном фоне (рис. 31). Такой объект постепенно отодвигается от глаз. Наблюдатель должен определить момент (а следовательно, и расстояние), в который две полоски сольются, т. е. не будут различаться как отдельные. Слияние полосок произойдет потому, что при малом угле φ исходящие от полосок лучи света (например, *аа'* и *бб'*) не будут попадать на отдельные светочувствительные элементы сетчатки. Для получения ощущения раздельности двух полосок необходимо, очевидно, чтобы между двумя возбужденными (освещенными) элементами сетчатки находился хотя бы один неосвещенный элемент. Минимальный угол зрения φ, при котором две соседние полоски еще видны как отдельные, называется остротой зрения.

Острота зрения зависит от яркости полосок и относительной контрастности их на темном фоне. Яркость изображения на экране телевизора лежит обычно в пределах от $B_{\text{макс}}=40$ *нт* до $B_{\text{мин}}=2$ *нт*. Как показали многочисленные эксперименты, в этом интервале яркостей острота зрения φ составляет примерно одну угловую минуту, или $^1/_{60}{}^\circ$. На эту цифру можно ориентироваться при разнообразных расчетах.

Подсчитаем, например, максимальное число строк разложения, выше которого не имеет смысла двигаться. Наилучшим расстоянием зрителя от телевизионного экрана считается расстояние, в 3—4 раза большее высоты экрана (рис. 32), т. е. $L=(3\div4)h$. При таком расстоянии наблюдения не возникает необходимости двигать головой для обзора всего изображения. Угол зрения α оказывается таким, что человек охватывает своим взором всю поверхность экрана. Этот угол

$$\alpha^\circ \approx \frac{h}{L}\,\frac{180}{\pi}=\frac{1}{3\div4}\,\frac{180}{3,14}=14^\circ\div20^\circ. \qquad (42)$$

Чтобы строчная структура телевизионного растра не была заметной (светящийся растр представляется в виде тонких светлых линий — строк, разделенных более темными промежутками), нужно, чтобы расстояние между строками в угловой мере было не больше остроты зрения. Таким образом определяется максимальное число строк:

$$Z_{\text{макс}}=\frac{\alpha}{\varphi}=\frac{14\div20}{1/60}=840\div1\,200.$$

Сравнив наш телевизионный стандарт $Z=625$ строк с $Z_{\text{макс}}=1\,200$ строк, можно придти к выводу, что мы примерно вдвое недоиспользуем предельной четкости. Однако практика показывает, что это не совсем так. Экспериментально установлено, что субъективная четкость A (оцениваемая человеком на глаз) не растет пропорционально числу строк (рис. 33). При увеличении числа строк более 600 субъективная четкость растет крайне медленно (всего на единицы процентов на каждую сотню строк). Таким образом, при увеличении числа строк с 600 до 1 000 зритель субъективно оценит увеличение четкости всего только процентов на пять.

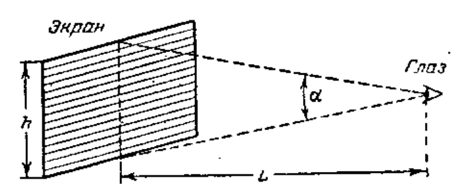


Рис. 32. К подсчету предельного числа строк разложения.

Это обстоятельство можно объяснить в первую очередь тем, что мы при определении $Z_{\text{макс}}$ пользовались полной остротой зрения в одну угловую минуту. В повседневной жизни человек редко пользуется максимальной остротой зрения. Чтобы разглядеть отдельные элементы с угловым расстоянием между ними порядка одной угловой минуты, нужно с напряжением в них всматриваться. Такое напряжение пришлось бы сохранять долго (в течение всей телевизи-

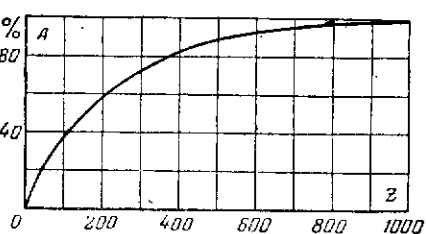


Рис. 33. Зависимость субъективной четкости A от числа строк разложения Z.

онной передачи). Кроме того, мелкие детали в телевидении вследствие ореола и внешней подсветки воспроизводятся с пониженной контрастностью, что ухудшает остроту зрения. Далее, в телевидении значительное место занимает передача движущихся изображений, при рассмотрении которых разрешающая сила глаза существенно падает. Наконец, в телевидении, так же как и в кино, для лучшей разборчивости и выразительности можно основной объект (например, лицо артиста) дать крупным планом.

Исходя из этих соображений и из графика на рис. 33, можно утверждать, что стандарт разложения в 625 строк по воспроизводимой четкости близок к оптимальному.

Надо заметить, однако, что часто на экране телевизора при 625 строках разложения изображение оказывается неудовлетворительным по качеству (размытым, нечетким). Объясняется это не недостаточностью строк разложения, а плохой работой отдельных узлов телевизионной аппаратуры из-за ограничения спектра частот во многих приемниках, недостаточно хорошим качеством передающей трубки, плохой гамма-характеристикой тракта, влиянием помех.

10. ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЧЕТКОСТЬ

В телевидении различают два вида четкости: по горизонтали и по вертикали. Такое разделение возникает в связи со строчной структурой телевизионного изображения. Дело заключается в том, что воспроизведение мелких деталей по горизонтали (вдоль строки) и воспроизведение деталей по вертикали (поперек строк) зависят от разных технических факторов. Поэтому удобно при изучении влияния этих факторов подразделять четкость на горизонтальную и вертикальную.

Разрешающая сила глаза у человека с нормальным зрением (лишенным астигматизма) не зависит от расположения мелких деталей. Поэтому при разработке телевизионной системы следует добиваться равенства четкости по горизонтали и вертикали.

Горизонтальная четкость в основном зависит от верхней границы полосы частот принимаемого сигнала и от апертурных искажений, связанных с конечным диаметром развертывающего луча. Вертикальная четкость практически не зависит от полосы частот, но в значительной степени зависит от качества чересстрочной развертки, числа строк разложения.

Для исследования четкости по вертикали удобно воспользоваться объектом в виде черных горизонтальных полос на белом фоне (рис. 34,*а*). Обычно расстояние между черными полосами выбирается равным их ширине. Располагая этот объект перед передающей камерой, мы получим на мишени передающей трубки изображение также в виде чередующихся черных и белых полос. При постепенном отодвигании этого полосатого объекта от камеры (и соответствующей фокусировке) полосы на мишени будут становиться все тоньше и тоньше, а число их на единицу высоты кадра все больше и больше. Наконец, наступит момент, при котором соседние черная и белая полосы расположатся на соседних строках развертки. Это будет предельным случаем, так как дальнейшее отодвигание объекта вследствие ограниченного числа строк не позволит воспроизвести полосы как отдельные.

Таким образом, максимальное число деталей по вертикали (максимальная вертикальная четкость $ВЧ_{\text{макс}}$) равно половине числа строк ($Z/2$ черных полос и $Z/2$ белых полос):

$$ВЧ_{\text{макс}} = \frac{Z}{2}. \quad (43)$$

На практике не удается на экране телевизора получить такое большое число расположенных по вертикали черных и белых полос. Представим себе, например, что объект в виде листа ватмана, на котором начерчены горизонтальные полосы, слегка переместился вверх или вниз (или камера немного поднялась или опустилась). Это незначительное перемещение может привести к полному слиянию полос на телевизионном изображении. На рис. 34,*б* изображен случай, когда черные и белые полоски случайно оказались расположенными между строками. Считывающий электронный луч передающей трубки даст для каждой строки усредненный сигнал, соответствующий серому (так как каждая строка наполовину белая, наполовину черная). На экране приемника вместо отдельных полос образуется сплошное серое поле (рис. 34,*в*), т. е. четкость по вертикали как бы падает до нуля.

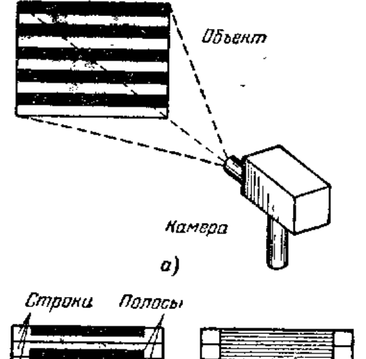


Рис. 34. Определение четкости по вертикали.

а — постановка опыта по определению вертикальной четкости; *б* — расположение полосок испытательного объекта между строками разложения; *в* — полное пропадание четкости при таком расположении.

К такому же явлению слияния полос приведут наклон или изгиб развертывающих строк, их перемещение из-за нестабильности источников питания, различная плотность строк по вертикали из-за нелинейности вертикальной развертки и т. п. Поэтому неправильно количественно определять четкость по вертикали числом строк разложения, так как при таком числе горизонтальных полос на испытуемом объекте четкость может упасть даже до нуля.

Для дальнейшего изучения этого вопроса будем раздвигать горизонтальные полосы и соответственно увеличивать их ширину до тех пор, пока взаимное расположение полос и строк не будет влиять на вертикальную четкость.

На рис. 35 представлен график зависимости относительной контрастности двух соседних (белой и черной) полос от взаимного расположения полос и строк. На этом графике $\frac{\Delta T_c}{T_c}$ — относительное смещение верхнего края черной полосы от верхнего края строки,

$T_п$ — ширина полосы и $T_с$ — ширина строки. Например, при $T_п = T_с$ (рис. 34) и $\frac{\Delta T_с}{T_с} = 0$ получается полная относительная контрастность $K = 1$, а при смещении полос на половину строки $\left(\frac{\Delta T_с}{T_с} = 0{,}5\right)$ значение $K = 0$. Если полосы шире (например, $T_п/T_с = 1{,}5$), то K ни при каких положениях $\Delta T_с/T_с$ не падает до нуля Для $\frac{T_п}{T_с} = 1{,}5$ и

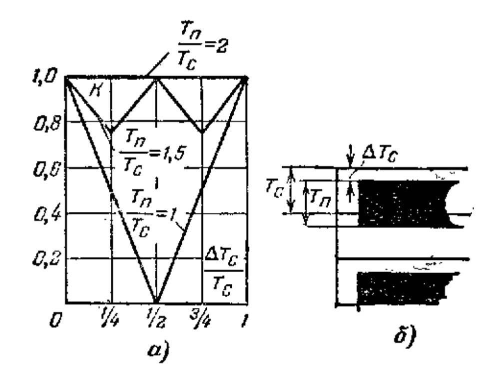


Рис. 35. Зависимость относительной контрастности от взаимного сдвига полос и строк.

а — график этой зависимости; *б* — рисунок, поясняющий обозначения на этом графике.

$\frac{\Delta T_с}{T_с} = \frac{1}{4}$, а также $\frac{\Delta T_с}{T_с} = \frac{3}{4}$ относительная контрастность падает до минимума $K = 0{,}75$.

При ширине полос $\frac{T_п}{T_с} = 2$ и при любом взаимном положении полос и строк относительная контрастность $K = 1$. Таким образом, казалось бы, что за меру вертикальной четкости нужно принять $ВЧ = \frac{Z}{4} = 0{,}5\frac{Z}{2}$, так как при этом $\frac{T_п}{T_с} = 2$ и относительная контрастность всегда равна 100%. Однако досадно признать, что при 625 строках разложения телевизионная система способна воспроизвести по вертикали только $\frac{625}{4} = 156$ черных и 156 белых чередующихся элементов. Если согласиться с допустимостью снижения

относительной контрастности этих элементов до 75%, то можно выбрать $\frac{T_п}{T_с} = 1{,}5$. Вертикальная четкость в этом случае составит:

$$\frac{Z}{2\cdot 1{,}5} = \frac{2}{3}\,\frac{Z}{2} = \frac{2}{3}\,ВЧ_{макс} \approx 0{,}7ВЧ_{макс}.$$

В этом случае $ВЧ = 0{,}7\cdot\frac{625}{2} = 220$*.

Таким образом, исходя из вышеизложенных соображений и опираясь на практику, можно определить четкость по вертикали следующим выражением:

$$ВЧ = k_в ВЧ_{макс}, \qquad (44$$

где $k_в = 0{,}75$ — поправочный коэффициент;

$ВЧ_{макс} = 0{,}5Z$ — максимальная (теоретически) вертикальная четкость.

Четкость по горизонтали (вдоль строк) исследуется с помощью объекта в виде вертикальных черных полос на светлом фоне (рис. 36). Очевидно, что перемещение такого изображения вверх и вниз или вправо и влево относительно строк разложения не вызывает изменений в воспроизведении изображения вертикальных полос. Таким образом, горизонтальная четкость не зависит от взаимного расположения изображения и строк развертки.

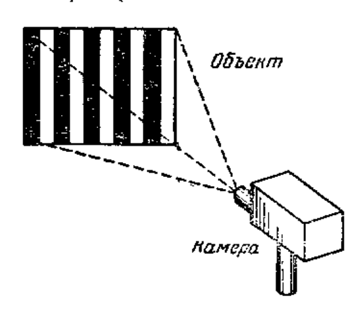


Рис. 36. Постановка опыта по определению четкости по горизонтали.

При отодвигании объекта от передающей камеры (при соответствующей фокусировке) на телевизионном изображении полосы будут становиться тоньше, а расстояние между ними меньше. Наконец, при определенном расстоянии объекта от фотокатода передающей трубки полосы начнут постепенно терять контрастность (будут сливаться в сплошное серое поле).

Такое ограничение четкости по горизонтали в первую очередь вызывается апертурными искажениями[1] и ограничением полосы частот телевизионного тракта. Для выяснения влияния апертурных искажений на горизонтальную четкость будем считать сначала, что полоса частот телевизионного сигнала достаточно большая, чтобы не вызывать частотных искажений изображения.

---

* Вертикальную четкость можно определить более точно, если из 625 строк вычесть число строк, пропадающих во время обратного хода по кадрам, т. е. около 8% строк. При этом $ВЧ = 220 \times 0{,}92 = 202$.

[1] В электронном телевидении апертурной принято называть сечение электронного луча в месте касания мишени (экрана).

Возникновение апертурных искажений объясняется на рис. 37. Предположим, что график распределения яркости вдоль какой-либо строки имеет вид, как на рис. 37,*а* (чередующиеся черные и белые полосы). Электронный луч передающей трубки скользит вдоль строки, создавая телевизионный сигнал (рис. 37,*б*). Если диаметр сечения луча $d_л$ меньше ширины полосы $T_п$, то сигнал имеет 100%-ную модуляцию, т. е. изменяется от $i_{макс}$ до $i_{мин}$. Если же луч оказывается шире полосы, т. е. $d_л > T_п$, то, находясь на черной полосе,

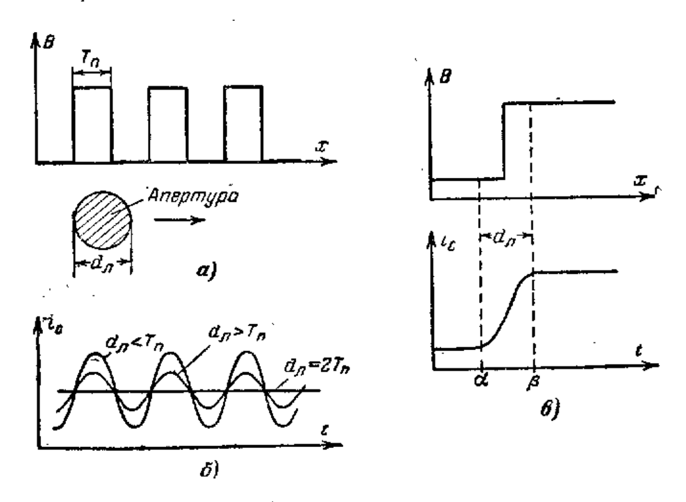


Рис. 37. Апертурные искажения.

а — воспроизведение апертурой конечных размеров П-образных импульсов яркости; *б* — форма тока сигнала при различных относительных диаметрах апертуры; *в* — искажение (растягивание) резких переходов яркости из-за апертурных искажений.

апертура будет частично захватывать и белую, а находясь на белой, — черную. Таким образом, «черный» сигнал посветлеет, а «белый» потемнеет, т. е. размах сигнала уменьшится. При $d_л = 2T_п$ луч будет одновременно покрывать и черную, и белую полосы, т. е. сигнал выродится в постоянную «серую» составляющую.

Другими словами, для воспроизведения мелких деталей вдоль строки электронный луч должен быть похожим на очень тонко отточенный карандаш. При большом диаметре апертуры мелкие детали будут смазываться.

Точно так же из-за апертурных искажений будут смазываться на изображении резкие переходы яркости (рис. 37,*в*). При этом появляется зона размытости αβ, что приводит к ухудшению резкости изображения.

Характер и степень апертурных искажений зависят от структуры сечения электронного луча. Нужно учитывать, что плотность тока электронного луча j в различных точках его сечения неодинакова. В центре сечения плотность j (количество электронов, прошедших через квадратный миллиметр) наибольшая и постепенно падает от центра к краю по закону

$$j = j_0 e^{-\left(\frac{x}{r}\right)^2}, \qquad (45)$$

вид кривой которого показан на рис. 38,*а*. При определении величины апертурных искажений следует учитывать такое распределение плотности тока в электронном луче.

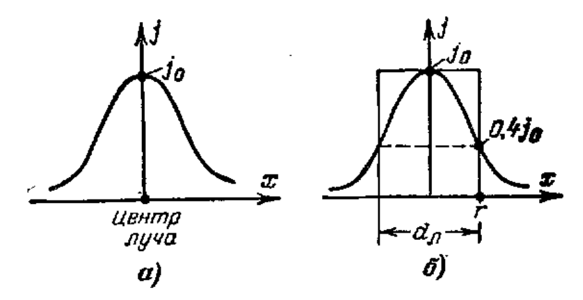


Рис. 38. Распределение плотности тока в электронном луче.

а — кривая распределения; *б* — определение действующего (эффективного) диаметра электронного луча.

Чтобы внести определенность в понятие эффективного диаметра электронного луча (апертуры), условно отсчитывают этот диаметр $d_л = 2r$ на уровне

$$j_0 \frac{1}{e} = j_0 \frac{1}{2{,}718} \approx 0{,}4 j_0.$$

При этом из формулы (44) при $x = r$ находят:

$$j_1 = 0{,}4 j_0 = j_0 e^{-1}.$$

Введение понятия эффективного диаметра электронного луча позволяет для упрощения расчетов апертурных искажений заменить истинное распределение плотности тока в электронном луче постоянной плотностью (рис. 38,*б*). При этом площади под кривой и в прямоугольнике оказываются примерно равными, т. е. токи реального и идеализированного лучей одинаковыми[1].

Очевидно, что апертурные искажения вследствие конечных размеров электронного луча имеют место и в приемной трубке. При подаче скачка напряжения на управляющий электрод кинескопа соответствующее изменение яркости вдоль строки на экране трубки не будет иметь резкой границы (рис. 39).

[1] Точнее говоря, $\frac{S_б}{S_а} = 2/1{,}77 = 1{,}12$, т. е. $S_б$ больше $S_а$ на 12%.

Количественной мерой апертурных искажений для передающей трубки $\delta_{пер}$ удобно выбрать относительное уменьшение амплитуды сигнала мелких деталей $i_м$ по сравнению с амплитудой крупных $i_к$ (рис. 37,б):

$$\delta_{пер} = \frac{i_м}{i_к}.$$

Соответственно для приемной трубки апертурные искажения $\delta_{пр}$ определяются снижением амплитуды яркости мелких деталей:

$$\delta_{пр} = \frac{B_м}{B_к}.$$

На рис. 40 представлен график апертурных искажений для широко распространенных передающей $\delta_{пер}$ (ЛИ7) и приемной $\delta_{пр}$ (35ЛК2Б) трубок. Здесь по горизонтальной оси отложено число че-

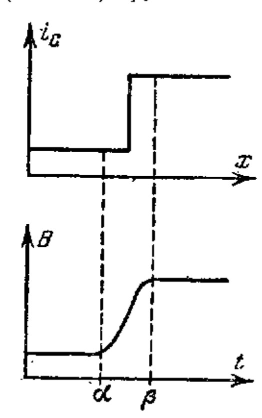


Рис. 39. Апертурные искажения на экране приемной трубки.

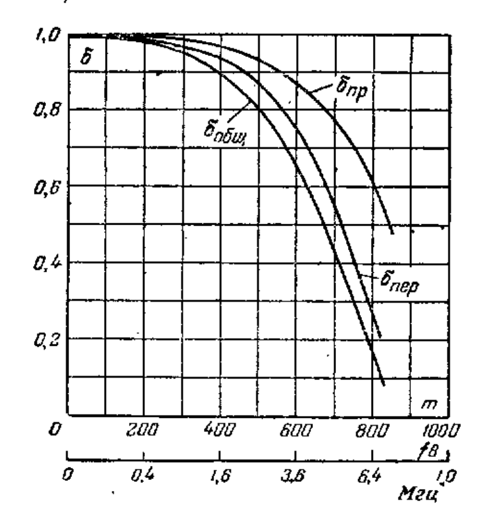


Рис. 40. Частотные характеристики приемной и передающей трубок.

редующихся вдоль строки черных и белых элементов m. Например, при 800 элементов на строке (из них 400 белых и 400 черных) для кинескопа 35ЛК2Б относительная контрастность этих элементов составит 60% от относительной контрастности крупных деталей. Еще более резко проявляются апертурные искажения в передающей трубке. Размах тока сигнала при тех же 800 черно-белых элементах вдоль строки падает до 25% от максимума.

Общая величина апертурных искажений определяется выражением

$$\delta_{общ} = \delta_{пер}\delta_{пр}. \qquad (46)$$

Таким образом, общие апертурные искажения оказываются весьма значительными, и для самых мелких деталей, определяемых отечественным стандартом в 700—800 на строку, составляют 0,15—0,25 от единицы.

Апертурные искажения снижают контрастность мелких деталей. Если считать, что для крупных деталей контрастность $\beta=30$, а за счет ореола и внутренней подсветки она снижается до $\beta=19$, то для мелких деталей

$$\beta_м = \delta_{общ}\beta = (0,15 \div 0,25)\cdot 19 \approx 3 \div 5.$$

Эксперименты подтверждают эти цифры.

11. СВЯЗЬ ЧЕТКОСТИ СО СПЕКТРОМ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ЧАСТОТ

По сравнению со спектром сигналов звукового вещания ширина спектра телевизионного сигнала примерно в 1 000 раз шире и составляет 5—6 *Мгц*. Такая огромная полоса частот нужна в первую очередь для хорошей передачи четкости по горизонтали. Чем больше черных и белых элементов располагается вдоль строки, тем шире оказывается необходимый спектр частот.

Для определения количественной связи между горизонтальной четкостью и верхней границей спектра телевизионных частот воспользуемся изображением в виде мельчайших чередующихся черных и белых квадратиков, как в шахматной доске (рис. 41,а). При уменьшении размеров этих квадратиков и соответственном увеличении их числа мы, наконец, придем к предельному случаю, когда сторона a квадратика будет равна ширине строки. Более мелкие квадратики телевизионной системой воспроизводиться не будут из-за ограниченной четкости по вертикали.

По отечественному стандарту формат телевизионного изображения p, т. е. отношение его длины к ширине составляет:

$$p = \frac{l}{h} = \frac{4}{3}. \qquad (47)$$

В предельном случае число квадратиков по вертикали равно числу строк Z, соответственно по горизонтали $pZ = \frac{4}{3}Z$.

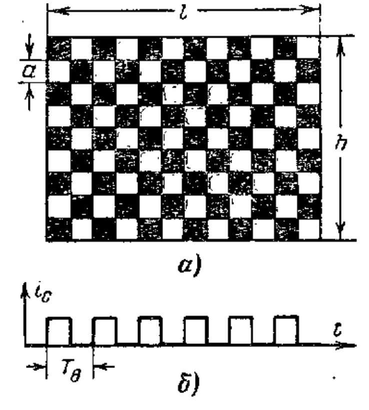


Рис. 41. К определению верхней границы спектра телевизионных частот.

а — изображение «шахматной доски», служащее для определения наивысшей частоты телевизионного спектра; *б* — ток сигнала, образующийся от изображения «шахматной доски».

Электронный луч передающей трубки, скользя по «шахматной доске», создаст сигнал, изображенный на рис. 41,б (от апертурных искажений мы на время отвлечемся), где $T_в$ — период сигнала, состоящий из времени передачи соседних черного и белого квадратиков. Количество таких периодов в секунду и определит верхнюю

границу полосы частот $f_в$. Подсчитаем это число. Вдоль строки укладывается $pZ/2$ периодов. На всем поле изображения их будет:

$$\frac{pZ}{2}\ Z.$$

Таких изображений „шахматной доски“ передается n штук в секунду (n — частота кадров). Таким образом,

$$f_{в.макс}=\frac{pZ}{2}\ Zn=\frac{pnZ^2}{2}. \qquad (48)$$

Нужно сказать, что проведенный таким образом подсчет верхней границы полосы частот не учитывает ряда факторов, которые мы рассматривали ранее. Так, на практике трудно осуществить условия, при которых число черных и белых элементов, расположенных по вертикали, равнялось бы числу строк. Поэтому приходится вводить поправочный коэффициент $k_в$, учитывающий снижение четкости по вертикали. Далее, вследствие апертурных искажений число черных и белых элементов вдоль строки также должно быть уменьшено на коэффициент $k_г$, учитывающий снижение четкости по горизонтали, причем $k_г \approx k_в$.

Практическая формула, определяющая верхнюю границу полосы телевизионных частот, имеет вид:

$$f_в=k_г k_в\frac{pnZ^2}{2}=k\frac{pnZ^2}{2}. \qquad (49)$$

Поправочный коэффициент k обычно берется в пределах 0,6—0,8, т. е. практически полоса частот на 20—30% оказывается меньше теоретически максимальной, определяемой по формуле (48).

Подсчитаем для примера полосу частот в отечественном телевизионном стандарте. Как указывалось ранее, в радиовещательном телевидении используется чересстрочная развертка. При этом частота полей $n_п=50$ в секунду, частота кадров $n_к=25$ в секунду, число строк в кадре $Z=625$, число строк в поле $Z_п=312{,}5$.

Примем $k=0{,}7$. Тогда

$$f_в=kn_п\frac{pZ}{2}\ Z_п=$$

$$=0{,}7\cdot 50\,\frac{4}{3}\,\frac{625}{2}\cdot 312{,}5=4{,}6\cdot 10^6\ гц.$$

При $k=0{,}8$ верхняя граница полосы частот $f_в=5{,}3$ *Мгц* (можно принять $f_в=5$ *Мгц*).

Если не использовать чересстрочную развертку, то при частоте кадров $n_к=50$ в секунду (меньше взять нельзя, так как будут заметны мелькания)

$$f_в=kn_к\frac{pZ}{2}\ Z=0{,}7\cdot 50\cdot\frac{4}{3}\,\frac{625}{2}\cdot 625=9{,}2\ Мгц,$$

т. е. в этом случае полоса частот почти удваивается, что существенно усложняет задачу усиления, передачи и приема телевизионного сигнала.

Из формулы (48) простыми преобразованиями можно получить зависимость числа черных и белых элементов на строке в зависимости от полосы частот[1]

$$pZ=\sqrt{\frac{2p}{n}}\,\sqrt{f_в}=\sqrt{\frac{2\cdot 4}{3\cdot 25}}\,\sqrt{f_в}=0{,}326\,\sqrt{f_в}. \qquad (50)$$

Для графика апертурных искажений на рис. 40 число элементов на строке pZ по формуле (50) можно пересчитать в эквивалентную полосу частот $f_в$, что и сделано на этом рисунке, где по горизонтальной оси дается дополнительная частотная шкала. Таким образом, апертурные искажения вида, как на рис. 40, аналогичны частотным искажениям (завалу частотной характеристики тракта на высоких частотах). В этом смысле можно говорить, что кривые $\delta_{пр}$ и $\delta_{пер}$ на рис. 40 являются частотными характеристиками соответственно приемной и передающей трубок.

Очевидно также, что завал верхних частот где-либо еще в телевизионном тракте (в видеоусилителях, передатчике, приемнике и пр.) приведет к снижению контрастности мелких деталей, расположенных вдоль строки, т. е. к снижению четкости. Таким образом, ширина полосы частот (точнее, ее верхняя граница), так же как и апертурные искажения, определяет четкость изображения по горизонтали.

12. ВЛИЯНИЕ ШУМОВ НА ЧЕТКОСТЬ

Напряжение шума, попадая вместе с полезным сигналом на управляющий электрод кинескопа, в первую очередь снижает контрастность как мелких, так и крупных деталей (вследствие появле-

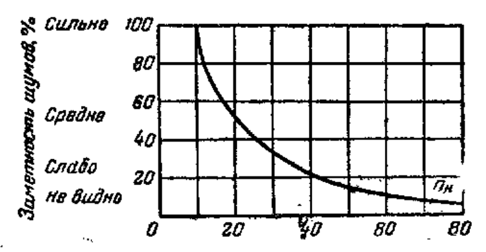


Рис. 42. Зависимость заметности шумов от частоты кадров.

ния шумовой вуали). Вместе с тем импульсы шума маскируют мелкие детали. При значительном уровне шума изображение оказывается покрытым пеленой хаотически мерцающих точек (у телезрителя

[1] Полоса частот определяется выражением $\Delta f=f_в-f_н$, где $f_в$ и $f_н$ — соответственно верхняя и нижняя границы полосы частот. В телевидении $f_в=5\cdot 10^6$ *гц*, а $f_н=50$ *гц*, т. е. $f_н \ll f_в$. Поэтому $\Delta f \approx f_в$, т. е. верхняя граница численно почти равна полосе частот.

создается впечатление, что изображение проглядывает сквозь мелкоструктурную снежную метель). Импульсы шума, кроме того, «размазывают» резкие границы переходов яркости, что приводит к ухудшению также и резкости изображения.

Действие шумов в существенной степени устраняется (усредняется) благодаря инерционности зрения и послесвечения люмино-

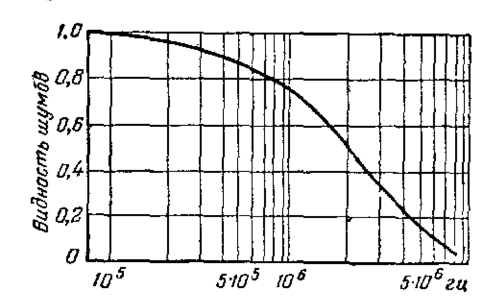


Рис. 43. Частотная характеристика глаза.

фора экрана. Но стандартное число кадров $n_к=25$ в секунду оказывается недостаточным для полного устранения видимых мерцаний и вспышек на изображении, вызываемых импульсами помех (чересстрочная развертка не помогает уменьшению заметности импульсов шумов). На рис. 42 представлен график заметности шума (в виде «снежной метели») для различного числа кадров в секунду. При $n_к=80$ в секунду и отношении сигнал/шум порядка 10 шум уже практически незаметен.

Для стандартного числа кадров $n_к=25$ в секунду качество изображения в зависимости от шумов показано в табл. 3.

Таблица 3

Влияние шумов на качество изображения

Оценка	Отношение сигнал/шум
Отлично	30—40
Хорошо	15—25
Удовлетворительно	5—10
Неудовлетворительно . . .	1—2

Примерный график видности шумов по спектру дан на рис. 43. Вследствие ограниченности остроты зрения высокочастотные (мелкоструктурные) шумы видны хуже низкочастотных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Халфин А. М., Основы телевизионной техники, «Советское радио», 1955.

2. Варбанский А. М., Телевизионная техника, Госэнергоиздат, 1959.

3. Кривошеев М. И., Оценка и измерение флуктуационных помех в телевидении, Связьиздат, 1960.

4. Игнатьев Н. К., Телевидение, Связьиздат, 1958.

5. Ломозова Н. З. и Левин С. Д., В помощь телезрителю. Госэнергоиздат, 1959.

СОДЕРЖАНИЕ